

# 二次元積層体による粒状体のせん断現象

落 合 英 俊\*

## Shearing Behavior of Granular Materials using the Two-Dimensional Horizontal Stack

by

Hidetoshi OCHIAI

(Civil Engineering)

In order to elucidate the shearing mechanism in granular materials such as sand and gravel, it is necessary to have a correct understanding of the fact that these materials consist of individual grains.

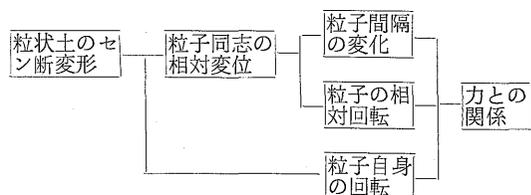
In this paper, two-dimensional shear test was carried out by using the two-dimensional horizontal stack of aluminium rods, and examined the shearing behavior of granular materials from the microscopic point of view. And in these examination, the change of distance between particles, the relative rotation between particles and the rotation of individual particles were mainly chosen as factors to control the shearing mechanism of granular materials.

### 1. ま え が き

土質工学の分野で材料とする土は一般に土粒子・水・空気の三相構造をなしており、個々の土粒子は外力の作用により、その相対的位置が変化しやすい。また土は均質性に乏しく、外的条件によってもその性質が著しく変化する。そのため土の応力・変形関係は非常に複雑なものとなっている。この複雑な土の応力・変形関係を考えるさいに、大別して二つの異なる考え方がある。一つは土を一つの連続体とする考え方で Roscoe<sup>(1)</sup>、太田<sup>(2)</sup>らによってなされている。この考え方は von Mises 的なモデルによって土の応力・変形関係を論じようとするもので、金属塑性学の流れをついだものといえよう。他の一つは土を個々の土粒子の集合体とする考え方で、Rowe<sup>(3)</sup>、松岡<sup>(4)</sup>らによってなされている。この考え方は土はみかけ上、摩擦法則に従う材料であるとし、土粒子の個々の接触点における応力と粒子の動きなどを問題とするもので、Coulomb 的な摩擦性物質の研究の流れをついだものである。前者の考え方は主に粘土に対して用いられ、後者の考え方は主に砂に対して用いられている

が、それら考え方の妥当性に対する正確な評価はまだなされていないのが現状である。

ところで粒状土のせん断変形を土粒子同志の相対変位として把らえらるとすれば、それらは粒子間隔の変化および粒子の相対回転に代表される。その他、土粒子の相対変位ではないが、粒子自身の回転も生じる。なおそれらには力との関係が必要である。以上のことをまとめると粒状土のせん断変形を次のように考えることができよう。



そこで砂礫のような粒状土の応力・変形関係の研究に際し、それら粒状土が粘着力のない土粒子の集合体であるという基本的立場に立脚し、そのせん断現象を

\* 土木工学科

以上述べた点に着目し、考察検討することは、そのセン断機構を解明するうえで極めて重要なことである。このような立場は上に述べた後者の考え方に近いが、一応 Coulomb 的なモデルをはなれて、主として現象論的に考察し、その考え方の妥当性をも検討しようとするものである。ところがそのような微視的立場から、そのセン断機構を検討するには、セン断中の個々の土粒子の運動特性について正確に把握することが必要であるが、実際の砂礫のセン断試験ではそれは非常に困難な問題である。そのため、ここでは土粒子の比重と比較的近いアルミ丸棒（比重2.7）の二次元モデルを用いることとし、その積層体を二次元圧縮セン断し、セン断中の粒子の挙動を微視的に把らえ、粒状土のセン断機構について検討した。

## 2. 試験および試験装置

試験には長さ 5.0cm、直径 2, 3, 5, 7, 10mm の5種類のアルミ丸棒（比重2.7）を用いた。均一径の規則的配列の場合には直径 7mm のアルミ丸棒を一本ずつ注意深く最密充てんになるように詰め込み、一般の混合粒径の場合には、重量比で直径 2, 3, 5, 7, 10mm のものを 1:2:3:2:1 あるいは 1:3:8:3:1 の割合で混合し、詰め込み方に多少問題があるが、同じ粒径のものができるだけ集まらないよう、さらに最大径の丸棒が供試体内にほぼ均等に分布するように特に注意して行なった。

試験装置は、土を個々の土粒子の集合体とみなすが、Coulomb 的な立場からは一応はなれるという考えか

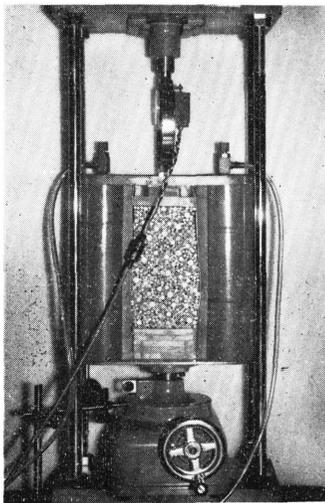


Photo. 1 Two-dimensional shear test apparatus

ら、最初からスベリ面が規定されている直接セン断装置とせず、二次元積層体に軸方向と横方向から主応力を加える二次元圧縮セン断装置とした。試験装置は Photo. 1 に示すもので、側圧  $\sigma_s$  は上下がシールされ、外側への変形が拘束されている直径 70mm の二本のゴムスリーブ円筒内に空気圧を加えることによって負荷し、軸応力  $\sigma_1$  は  $5 \times 10$ cm のアクリル製板を介して載荷し、力計により読み取った。なお試料と載荷板との間にはシリコングリースを塗布したゴムスリーブ（厚さ 0.2mm）を挿入し、摩擦を軽減した状態で二次元圧縮セン断試験を行なった。供試体断面積は幅約 10cm、高さ約 20cm である。試験に際しては軸荷重は X-T 記録計に自記させ、軸変位 1 mm 毎に写真撮影を行ない、セン断中の微視的特性については写真上で検討した。セン断中の粒子回転の測定はアルミ丸棒断面に ⊕ 印の記号をつけ、写真撮影したものを万能投影器で読み取り、間ゲキ比測定の場合には、アルミ丸棒断面に白ペンキを塗った試料についてミニコピー用フィルムで写真撮影し、測量用面積計のデジタルプランイメーター（キモトプラニ Z-1）により機械的に読み取った。

## 3. 均一径の規則的配列

二次元モデルの最も簡単な例として、均一径の規則的配列の場合、その変形について Rowe<sup>(3)</sup> は簡単な幾何学的考察を行なっている。すなわち Fig. 1 に示すように平行に積んだ均一径丸棒に  $\sigma'_1$ ,  $\sigma'_2$  の応力を与える場合を考える。1本の丸棒は上下各々の面で二つずつの接触をするので、この接触部分における丸棒のスベリの機構を相接する二つの剛塊間のスベリと同様なものと考えている。さらにこのような均一径の規則的配列の破壊の機構を Fig. 1(b) に示すように、水平面に並ぶ棒が互いに離れてその中間に上の棒が落ち込むという形を仮定し、粒子間の粘着成分を無視す

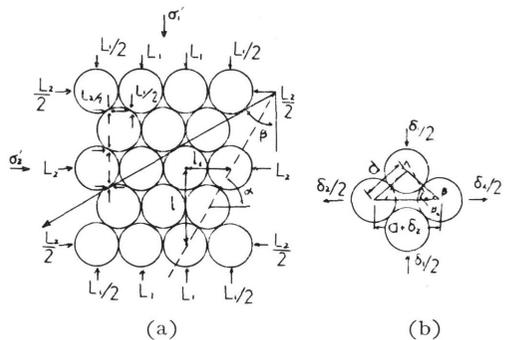


Fig. 1 Uniform rods in a parallel stack (Rowe, 1962)

れば、幾何学的考察より次式が得られる。

$$\frac{\sigma'_1 \cdot \dot{\epsilon}_1}{\sigma'_2 \cdot \dot{\epsilon}_2} = \frac{\sigma'_1}{\sigma'_2 \left(1 + \frac{dV}{V \dot{\epsilon}_1}\right)} = \frac{\tan(\phi\mu + \beta)}{\tan \beta}$$

ここに  $\beta$  は丸棒接触点における切線が  $\sigma'_1$  方向とな

す角、 $\phi\mu$  は粒子間摩擦角、 $\dot{\epsilon}_1, dV/V$  はそれぞれある時間内の  $\sigma'_1$  方向のヒズミ増分、体積変化分、 $\dot{\epsilon}_1$  は圧縮を正、 $dV/V$  は体積膨張を正としている。上式は体積膨張の間に  $\sigma'_1$  がこの集合体に行なった仕事と、集合体が  $\sigma'_2$  に対してなした仕事の比を示し、 $\phi\mu=0$  ならば  $\sigma'_1 \cdot \dot{\epsilon}_1 / \sigma'_2 \cdot \dot{\epsilon}_2 = 1$  となり、また  $\phi\mu$  が大きくなるに伴ない摩擦によって内部で費いやされる仕事が増大することを示している。

直径 7 mm のアルミ丸棒を規則的に最密状態に配列し、二次元的にセン断した場合の応力・ヒズミ関係を Fig. 2, ピーク付近の変形状態を Photo. 2(a)に示す。この場合の変形は幾何学的配列によって定まるある面に沿って、2つのブロックがスベリを起こし、その面上の粒子が下の粒子に対して一斉に乗り上がり、乗り越えるという運動である。そしてその面上における破壊の機構は Fig. 1(b) に示すように、水平面に並ぶ棒が互いに離れて、その中間に上の棒が落ち込むという形をとり、Rowe が幾何学的に予想したとおりである。応力・ヒズミ関係はヒズミの増加に伴ない応力の顕著な増加がみられ、ヒズミ約 2% 付近でピークを示したのち急激に減少する。粒子の動きと対比させると、スベリ面上の粒子が一斉に乗り上がる状態が応力のピークに相当し、乗り上がりの状態から乗り越えの状態への移行に伴ない応力は急激に減少する。このスベリ面上に沿う粒子の乗り上がり、乗り越えるという一連の動きが終了すると粒子配列はセン断前の規則的配列にもどる。

Fig. 2 の第 2, 第 3 の応力のピークはこのようなスベリ面上の粒子の一連の乗り越え運動が 2 回, 3 回と繰り返して生じた結果である。なおこの均一径の規則的配列の場合、セン断中の間ゲキの変化はすべてスベリ面上にのみ限定され、他の領域では変化しない。

それゆえ、セン断中の間ゲキ比変化は幾何学的考察より算定することができることをつけ加えておく。

Fig. 3, Photo. 2(b) は直径 2, 3, 5, 7, 10mm の 5 種類アルミ丸棒を重量比 1:2:3:2:1 の割合で混合した試料についての応力・ヒズミ関係と  $\epsilon_1=8.6\%$  における変形状態である。この例では混合割合に多少問題があるが、混合粒径での応力、ヒズミ関係は砂礫のような粒状土の場合と非常に良く似た形となり、アルミ丸棒の二次元積層体でも粒状土のセン断現象をかなりうまくシュミレートできると考えられる。この場合の変形性状は均一径の規則的配列のように一つの面に沿う明確なスベリの現象は生じず、上下のクサビが押し込まれて、側方に膨れだす。供試体内の個々の粒子の移動軌跡は、上下載荷板および供試体中央を通る  $\sigma_1$  方向線に近い粒子はほぼ  $\sigma_1$  方向に移動し、供試体

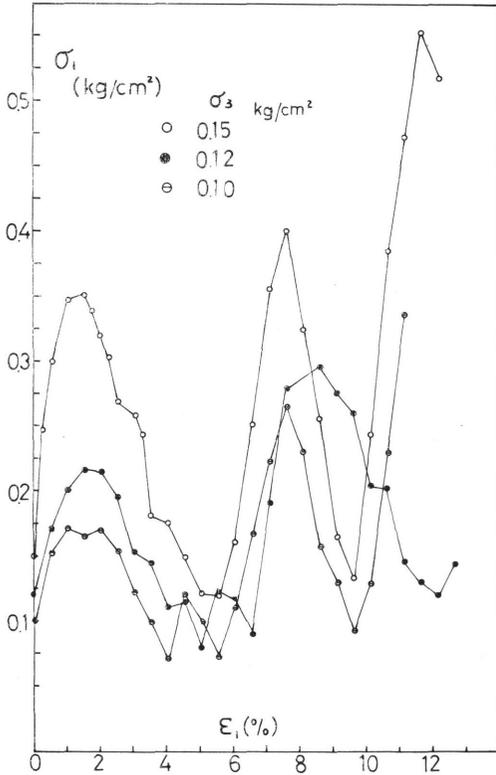
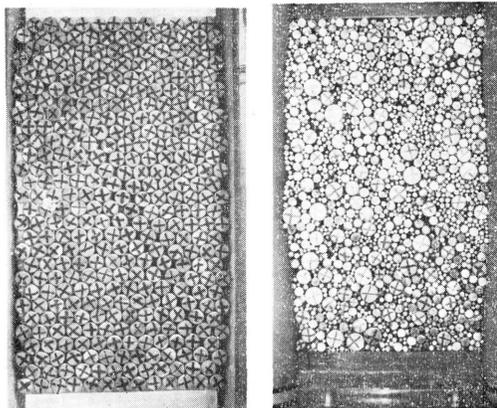


Fig. 2 Relationship between stress and strain (Uniform rods in a parrallel stack)



(a)  $\epsilon_1=2.0\%$  (b)  $\epsilon_1=8.6\%$

Photo 2 The state of deformation during shear

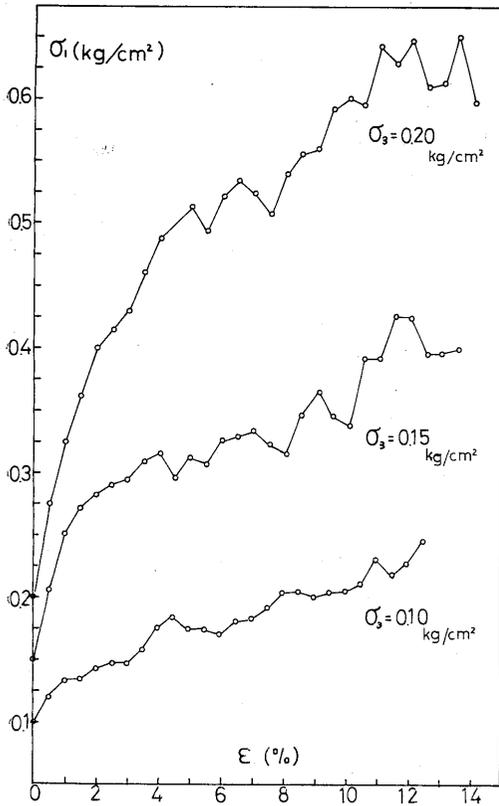


Fig. 3 Relationship between stress and strain (Packings of mixtures in rods with fifth kind of diameters)

中央を通る  $\sigma_3$  方向線に近い粒子および供試体の比較的外側に位置する粒子は  $\sigma_3$  方向に移動する (Fig. 6 参照)。このように均一径の規則的配列では幾何学的配列により定まる一つのスベリ面に沿う粒子の移動のみを取り上げて論ずればよいが、一般の混合径の場合には明確なスベリ面は生じず、全体的に側方に膨れだし、各領域によって変形性状が異なるので、供試体全体の粒子について考慮する必要があり、均一径の規則的配列と一般の粒子配列ではその変形性状は異なるものであることが知られる。

#### 4. 混合径の一般的な粒子配列

以上のように混合径の一般的な配列状態では、供試体内で変形がはげしい領域とさほどはげしくない領域が生じるので、供試体内をいくつかの領域に分割し、各領域毎に検討する必要がある。そこで供試体内をいくつかの領域に分割するにあたり次のようなことを行なった。供試体内から約50個の粒子を選びだし、それ

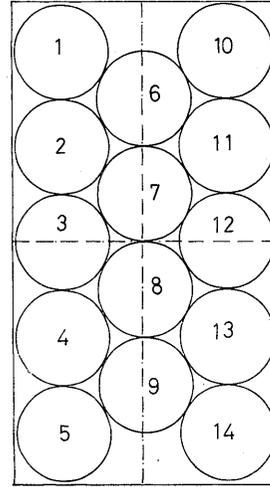


Fig. 4 Division in sample

ら粒子に接触する粒子数を数える。一般に変形の大きい所では間ゲキ比変化がはげしくなると考えられるので、密な詰め込み状態では間ゲキ比が大きくなる。つまり注目している粒子に接触する粒子数は減少すると考えられる。このような考えのもとに詰め込み時を基準にして、接触点数の増減についての等高線を描くと、供試体内を大まかに3つの領域に分割することができる。つまり上下荷板付近のクサビ部分 (通常 Dead Zone と呼ばれている部分)、供試体のほぼ中央部分、およびそれら两部分にはさまれる部分である。そこでそれらの部分の境界をできるだけうまく表わすようにするため、Fig. 4 に示すように供試体内に14個の円を描き、円番号を適当に組み合わせる供試体内を分割することにした。なお、Fig. 3 に示したものは粒径の大きいものが多すぎるきらいがあるので、以下直径2, 3, 5, 7, 10mm のアルミ丸棒を重量比 1:3:8:3:1 の割合で混合した試料についてのものをとりあげている。

#### 4.1 粒子移動方向について

Fig. 5 のような応力・ヒズミ関係を示す試料について考えてみる。図中矢印は軸変位  $\Delta h = 10, 20, 30\text{mm}$  を示しており、 $\Delta h = 10\text{mm}$  はピーク強度、 $\Delta h = 20, 30\text{mm}$  はピーク以後の残留状態に相当するものである。軸変位の進行に伴う供試体内の粒子移動方向を  $\Delta h = 0, 10, 20, 30\text{mm}$  の場合について示したものが Fig. 6 である。全体的な傾向は前に述べたことと同様である。そこでセン断前の供試体中央部を原点にし、 $\sigma_1$  方向を y 軸、 $\sigma_3$  方向を x 軸とする直交座標軸をとり、軸変位  $\Delta h$  に対する x 方向への変位  $\Delta x$  の比  $\Delta x/\Delta h$ 、y 方向への変位  $\Delta y$  の比  $\Delta y/\Delta h$  を約140個の粒子につい

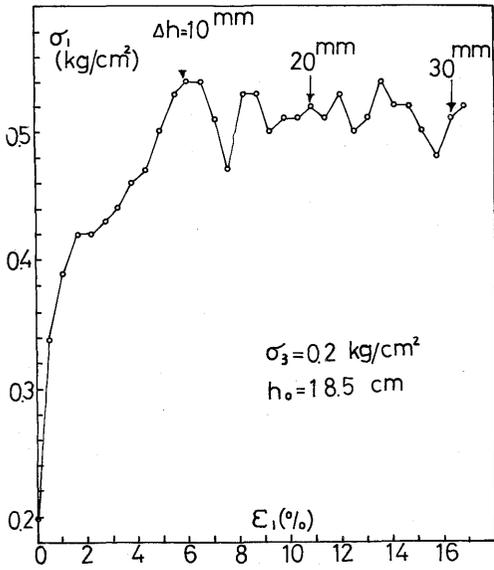


Fig. 5 Relationship between stress and strain

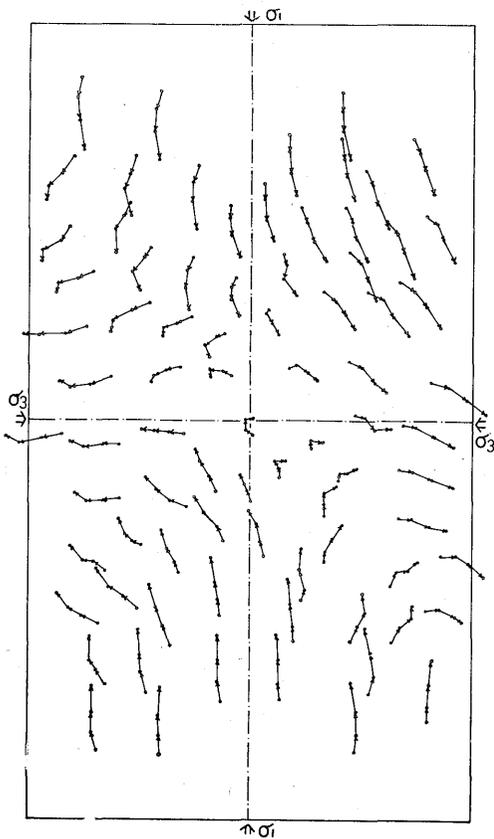


Fig. 6 Directions of particles movements during shear

て考えることにする。その際、Fig.4 の円番号 1, 5, 6, 9, 10, 4, を Zone I, 円番号 3, 7, 8, 12 を Zone II, 円番号 2, 4, 11, 13 を Zone III とする 3 つの領域に供試体内を分割し、各領域毎の粒子移動方向の度数分布を示したものが Fig.7 である。Zone I は x 方向への移動が少なく、y 方向への移動が大半を占めており、この領域は従来から言われているように Dead Zone として、セン断試験結果の解釈に際して除外して考える領域であることを示している。供試体中央部の Zone II では荷板の偏心の影響が多少見られるが、y 方向への移動は比較的少なく、x 方向へほぼ均等に变化する。Zone III ではバラツキがあるが、 $\Delta x/\Delta h$ ,  $\Delta y/\Delta h$  とともに  $\pm 0.3$  前後にピークをもつ分布をなしている。このことは応力のピーク以後  $\sigma_1$  方向に対してはほぼ  $\pm 45^\circ$  付近方向へ粒子の移動を生じることを示している。以上のような点から、スベリが主として Zone III の領域で生じていると考えてよいであろう。

以上は供試体内を 3 つの領域に分割したものであるが、供試体中央部をさらに 2 つに分割し、円番号 3, 12 を Zone II, 円番号 2, 4, 11, 13 を Zone III, 円番号 7, 8 を Zone IV とすることにし、粒子の移動方向を  $\sigma_1$  方向に対する角度  $\alpha$  としてとりだし、その絶対値の平均値  $|\bar{\alpha}|$  を考えてみる。ここでは Fig.8 に示す軸応力、軸変位関係を示す 2 個の試料について検討することにし、図中破線矢印で示すような応力のピーク前後で変化のはげしい点に着目して調べた。Fig.9 にその結果を示す。各領域で大きな差があるが、各領域についてみると、セン断に伴ないその移動方向に顕著な変化はみられず、ピーク前後ではほぼ一定とみなして差しつかえないであろう。Zone III で主としてスベリが生じているとすれば、アルミ丸棒の粒子間摩擦角  $\phi$  が約  $20^\circ$  程度 (Fig.3 あるいは Fig.8 のピーク時の応力比より求めた摩擦角とは当然異なる) であることを考慮すれば、最大主応力  $\sigma_1$  方向と  $45^\circ - \phi/2 \approx 35^\circ$  でスベリが生じていることになり、Zone III での  $|\bar{\alpha}| \approx 55^\circ$  とは約  $20^\circ$  程度の差がある。一方、スベリ領域として Zone III と IV を含めた供試体内でクロスする部分を考えて、 $|\bar{\alpha}| \approx 45^\circ \sim 48^\circ$  となり、粒子移動方向といわゆるスベリ面とは  $10^\circ \sim 13^\circ$  程度の差があることになる。いずれにしても、いわゆるスベリ面といわれているものと粒子移動方向には差があり、この点を粒状土の応力・ダイレイタンスー関係に導入する必要があると同時に、三軸試験等の解釈にあたっては Dead Zone 等のスベリに関係しない部分の取りあつかいが重要である。

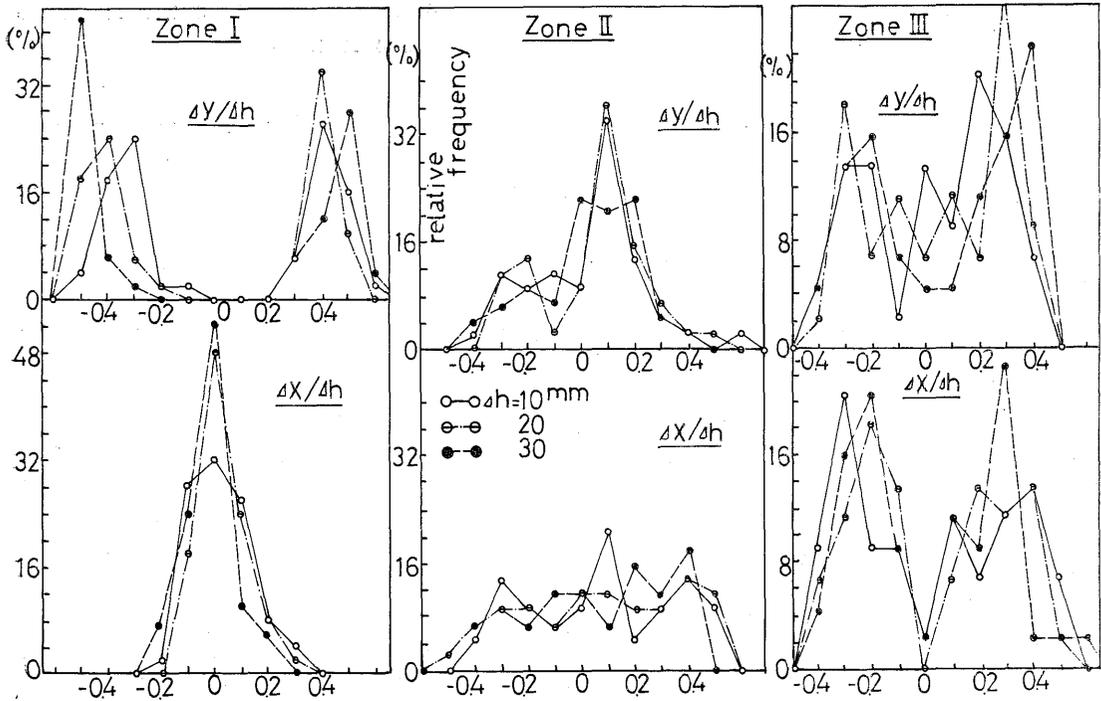
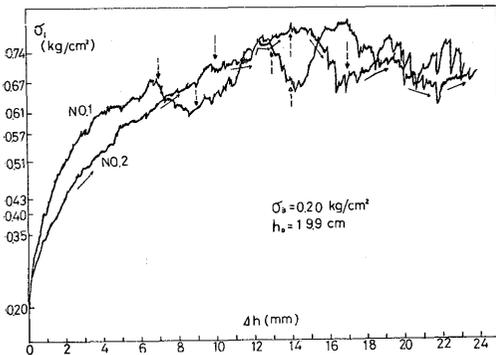
Fig. 7 Frequency distribution of  $\Delta x/\Delta h$ ,  $\Delta y/\Delta h$ 

Fig. 8 Relationship between axial stress and axial displacement

#### 4.2 粒子間接触角について

まえがきで述べたように粒状土のセン断変形を粒子同志の相対変位としてとらえたとすれば、粒子の相対回転はその主要な因子である。そこで供試体内より約80個の粒子を選び、その粒子に接触するすべての粒子

との間の中心線と $\sigma_1$ 方向との角度 $\theta$ を測定し、セン断中の変化を調べた。粒径が異なることや、詰め込み時の間ゲモ比分布の不均一性のため、セン断前の粒子間接触角 $\theta$ の度数分布に一定性がみられないので、ここではセン断前 $\Delta h=0$ を基準にして、ピーク時と残留状態の場合との相対度数の変化に着目した。Fig. 10はFig. 5に示す試料について、 $\Delta h=0, 10, 30$ mmの場合の結果であり、円はセン断前の詰め込み時を示し、放射状線は注目している粒子中心の回りを $\sigma_1$ 方向に対して時計回りに $20^\circ$ 間隔、18区間に分割した各区間の midpoint 値を示している。相対度数の増加分は外側へ、減少分は内側へ向かってプロットし、実線が $\Delta h=0 \rightarrow 10$ mm、破線が $\Delta h=0 \rightarrow 30$ mmである。主としてスベリに関するZone IIIについてのみ考えると、ピーク強度付近に達すると( $50^\circ \sim 70^\circ$ )および( $230^\circ \sim 250^\circ$ ),  $170^\circ$ および $350^\circ$ を結ぶ方向で接触する粒子が多くなり、ピークを過ぎて残留状態に達すると $70^\circ$ および $250^\circ$ ,  $110^\circ$ および $270^\circ$ ,  $150^\circ$ および $330^\circ$ を結ぶ方向に接触する粒子が多くなるように変化する。このような粒子間接触角の変化をさらに詳しく検討するた

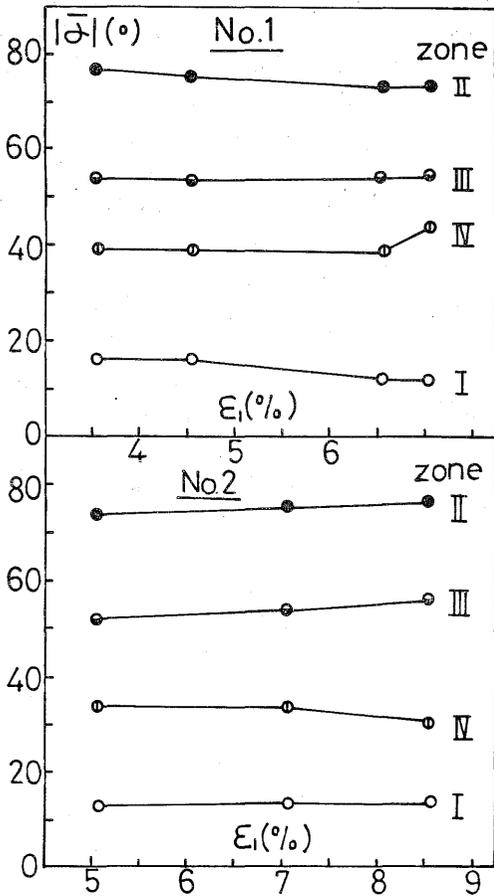


Fig. 9 Change of  $|\bar{\alpha}|$

め測定角度  $0^\circ \sim 360^\circ$  を  $0^\circ \sim 90^\circ$  におき直し、すなわち Fig 10(a) を  $\sigma_1$  軸に対し折り返し、さらに  $\sigma_3$  軸に対して折り返す操作をし、角度の分割を  $10^\circ$  間隔で行ない Fig 10(a) と同様に図示したものが Fig 10(b) である。いわゆるスベリが  $\sigma_1$  方向に対して  $45^\circ - \phi/2 \doteq 35^\circ$  の角度で生じているとすれば、ピーク強度に相当する  $4h=10\text{mm}$  ではそのスベリ方向における接触粒子は非常に減少し、その方向から  $20^\circ$  程度傾いた方向で接触する粒子が非常に増加することがわかる。これは4.1で述べた Zone III での粒子移動方向とスベリ面との間に約  $20^\circ$  程度の差があることと対比させると非常に興味ある事実である。すなわちスベリ領域における粒子の移動方向はいわゆるスベリ方向と約  $20^\circ$  程度（この角度は種々の条件によって変化するものと考えられる）の差があり、さらにピーク強度付近ではスベリ方向に接触する粒子が減少し、粒子移動方向に接触する粒子が非常に多くなっていく。このことは粒状土のセン断機構を暗示する極めて興味ある事実のように思われる。一方ピーク強度を過ぎて残留状態

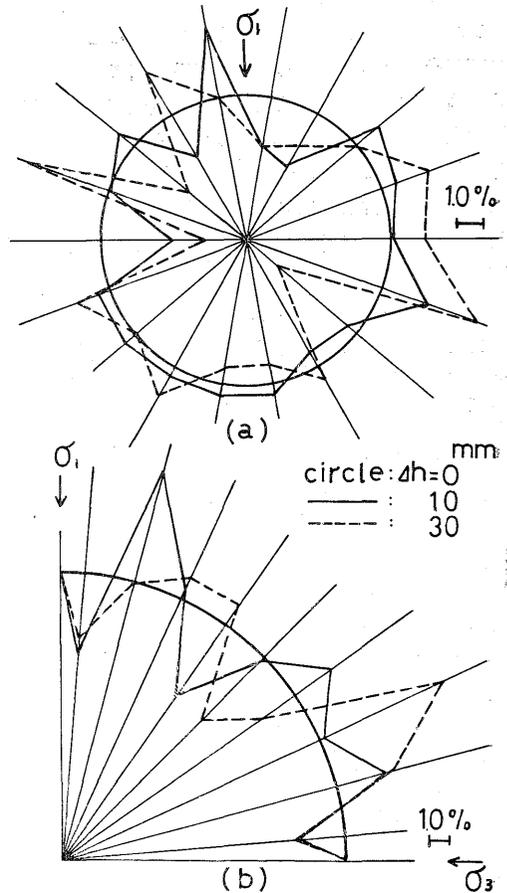


Fig. 10 Change of relative frequency of  $\theta$  (Zone III)

に達すると、スベリ方向に接する粒子数も増加し、ピーク付近とはその様子が異なってくる。つまり粒子間接触角  $\theta$  の度数分布の形がセン断とともに変化することがわかる。特徴的な点は、多少のズレがあるが、ほぼスベリ方向に対してピーク強度付近と残留状態付近では大体対称的な分布状態をなすことである。松岡<sup>(4)</sup>は粒状体のセン断機構に関する研究で、粒子接点角の度数分布の概念を強調し、セン断変形に伴ない粒子接点角の度数分布がある一定のパターンで変化すると述べている。松岡の粒子接点角とここでとりあげた粒子間接触角とは考え方に相違があるが、セン断に伴うその変化の傾向が類似している点は興味あることである。なおここで取り上げた粒子間接触角は注目している粒子に接触しているすべての粒子との間の接触角を測定しているが、ただ単に接触している粒子のみをとりあげただけでは不十分であり、それら粒子間に伝達する力との関係を調べるのが不可決の問題である。本文ではその点が考慮されていないことをことわっておくとともに今後検討していきたい。

4.3 粒子回転について

アルミ丸棒の二次元積層体をセン断すると丸棒は長軸方向を軸として回転しながらある方向に移動する。この個々の粒子の回転は粒子の相対変位ではないが、粒状土のセン断現象を理解するうえで検討しなければならない問題である。セン断中の砂粒子の構造変化に関する研究を行なっている小田<sup>(5)</sup>はセン断変形に伴う粒子長軸の配列性の変化が粒子の回転によって説明されるとし、ヒズミ増分に与える粒子回転の影響は無視できないと述べている。

ここでは粒子の回転量が粒子移動距離に対して、どの程度の割合になるかを調べた。すなわち軸変位  $h$  に対する粒子移動距離  $r$  の比  $r/h$  に対して粒子回転角  $\omega$  の値をとって考える。なおすべての粒子が同一方向にのみ回転するものではなく、また個々の粒子もセン断とともに回転方向が逆になるものもあるが、ここではセン断前の初期状態を基準にして、回転角  $\omega$  の絶対値の平均値  $|\bar{\omega}|$  をとることとする。以下のデータは Fig. 8 に示す試料についてのものであり、供試体内の分割も4.2の場合と同様、4つの領域に分けている。

各 Zone毎に  $r/h$  の値を示したものが Fig. 11(a)である。Zone I およびIIの値がかなり大きいのが、Fig. 9の結果と考え合わせると、Zone Iは上下載荷板によって押し込まれるクサビ部分で、ほとんど鉛直方向に移動する領域であり、Zone IIは主として側方向へ押し出される部分で、これら領域はスベリの機構には直接関係しないと考えてよいであろう。スベリ領域と考えられる Zone IIIとIVでは、Zone IIIで  $r/h=0.35 \sim 0.40$ 、Zone IVで  $r/h=0.25 \sim 0.30$  で差があるが、Zone IVは供試体中央部に位置するためその値が小さくなり、Zone IIIは上下クサビ部分および側方へ押し出される部分と隣接する関係からその値は大きくなる Fig. 11(b)は各 Zone 毎の  $|\bar{\omega}|/(r/h)$  の値を示すものである。Zone I およびIIでは粒子の回転量は比較的小さく、さらにセン断による大きな変化はない。またセン断に伴う  $r/h$  の変化がほとんどないので、これらの Zone では粒子回転がほとんどセン断の初期に生じていることがわかる。さらにこの両 Zone では Fig. 11(a) に示すように粒子の移動距離は非常に大きい。これらの点を考えると、スベリに関係しない領域

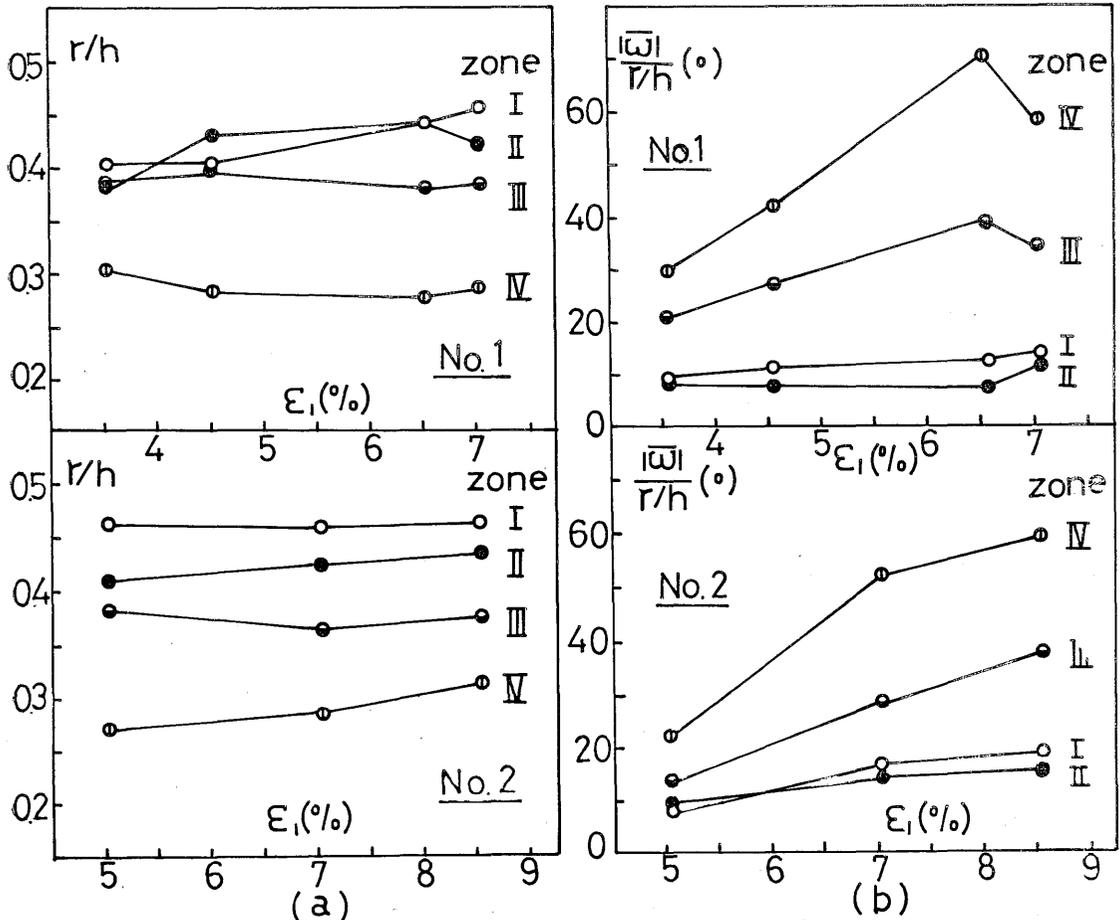


Fig. 11 Rotation of individual particles

では、たとえ粒子の移動距離が大きくとも粒子自身の回転は非常に小さく、さらにその回転もセン断の初期に生じ、その後のセン断変形にともなう粒子自身の回転は非常に小さいということがいえる。一方、スベリに関する Zone III と IV ではセン断の進行に伴ない粒子自身の回転量も増大し、その値もかなり大きい。平均的な値を考えても、No. 1 の場合、 $\epsilon_1=6.5\%$  で Zone III で  $14.6^\circ$ 、Zone IV で  $19.7^\circ$ 、No. 2 の場合、Zone III で  $10.3^\circ$ 、Zone IV で  $15.1^\circ$  の粒子回転が生じている。供試体中央部の Zone IV の方が Zone III に比べて約  $5^\circ$  ほど大きいのが、これは周辺から拘束された状態でスベリが生じるために、回転量が大きくなるものと考えられる。いずれにしても、スベリが生じていると考えられる領域では粒子の移動距離が小さくともセン断の進行にともない粒子自身の回転が生じ、その回転量も増加していくことがわかる。なお 4.4 で述べるが応力・ヒズミ関係のノコギリ歯状現象は供試体内の「ブリッジの形成と崩壊」に関するものと考えられるが、そのブリッジの形成と崩壊の際に粒子の回転方向が逆になるものも少なくないので、実際は Fig. 11(b) に示す値より大きくなる。また実際の砂でも、小田が述べているように粒子の回転は粒子長軸方向の配列に影響し、セン断中の構造変化、しいてはセン断変形特性に影響するものと推測される。

4.4 間ゲキ比分布について

混合粒径の試料をある間ゲキ比に詰め込む場合、試料全体についてみると、巨視的量としてのその平均間ゲキ比のまわりにある分布をなした詰め込み状態になるはずである (Fig. 13 および Fig. 14 参照)。そのような巨視的量としてのある間ゲキ比に詰め込まれた試料にセン断力を作用させると、1. で述べたセン断にともなう粒子間隔の変化と関連して供試体内の間ゲキ比分布形状は変化するはずである。そこで Fig. 13 に示すように供試体内を64個の三角形要素に分割し、セン断にともなう各要素の間ゲキ比変化を調べた。Fig. 12 はここでとりあげたものの軸応力・軸変位関係であり、初期詰め込み時の三角形要素の間ゲキ比を Fig. 13 に示している。以上述べてきたように少なくとも上下荷板付近のクサビ部分はスベリに関係しないはずであるので、以下のデータには Fig. 13 の上下各々8個の三角形要素を Dead Zone として除外した48個の三角形要素について考えた。Fig. 14 はセン断にともなう供試体内の間ゲキ比分布形状の変化を示すもので、図中矢印は平均間ゲキ比  $e=1/48 \sum e_i$  である。詰め込み時には上に述べたように平均間ゲキ比に対する散らばりが比較的小さな、ほぼ正規分布で近似できる状態をなすが、このことは二次元モデルに限らず、実際

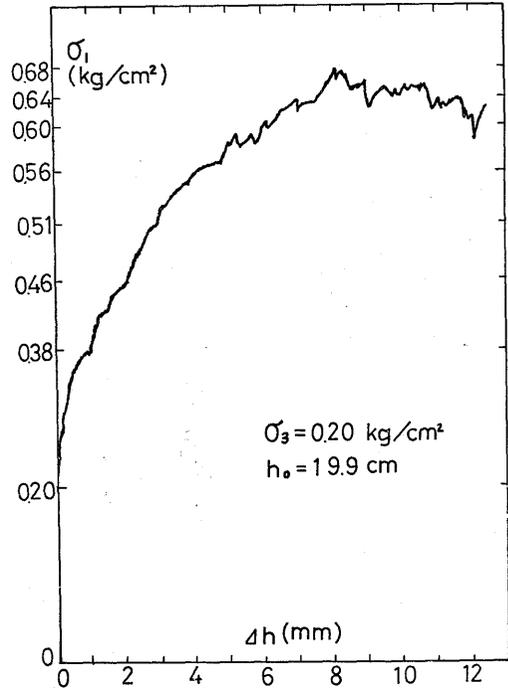


Fig. 12 Relationship between axial stress and axial displacement

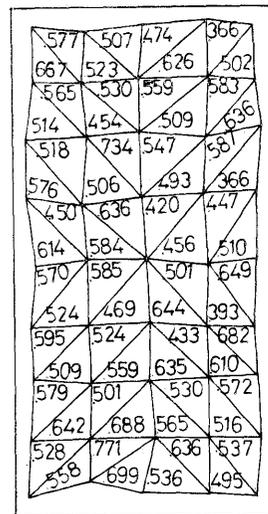


Fig. 13 Division in sample and [initial void ratio

の砂礫においても同様の傾向をなすであろうことは容易に予想できる。軸変位を増加させていくと、その分布形状はほぼ、正規分布に近い形を保ちながら変化するが、平均値に対する散らばりが次第に大きくなっていくと同時に平均間ゲキ比も増加していく。このように、間ゲキ比分布の形状はセン断変形とともに、ある一定

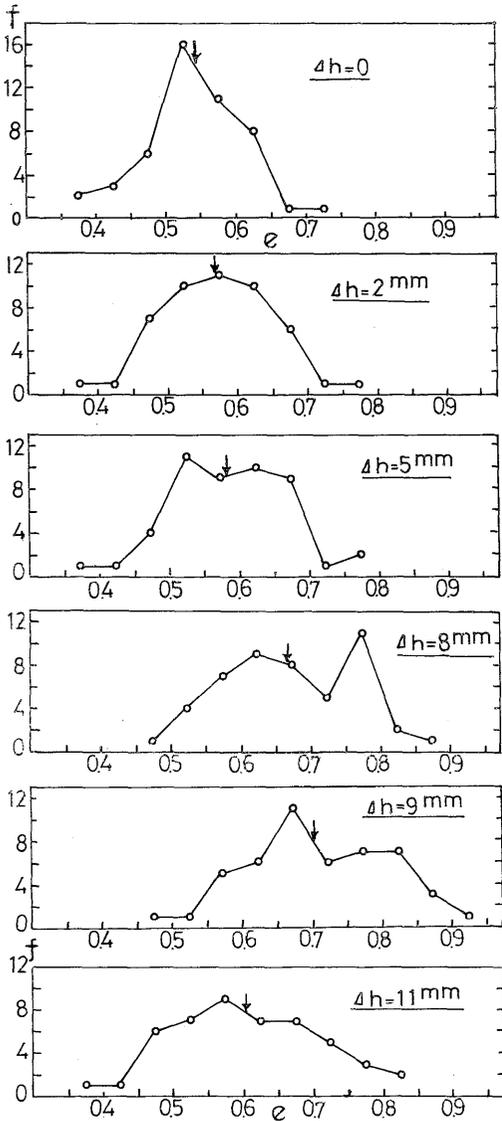


Fig. 14 Frequency distribution of void ratio during shear

のパターンに従って変化していくものと考えることができる。Fig. 15 は Fig. 14 の結果にもとづき、平均間ゲキ比  $e$ 、標準偏差  $s$  と軸変位の関係を示すものである。ピーク強度を過ぎると間ゲキ比が急激に減少すること、および  $\Delta h = 1 \text{ mm}$  付近で間ゲキ比が増加することなど、二次元モデルの限界を示すことが問題であるが、セン断とともに平均間ゲキ比および標準偏差が増加し、ピーク強度付近ではほぼ最大値をとること、また Fig. 14 に示すように間ゲキ比分布形状はセン断中、ほぼ正規分布で近似できることなら、粒状土のセン断機構を論ずることが可能であると考えられ、現在

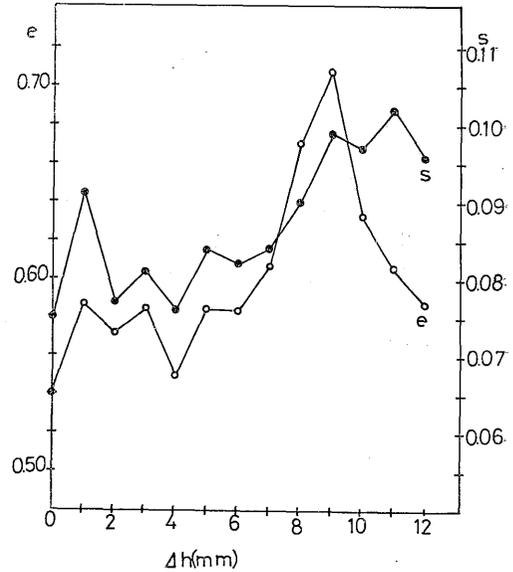


Fig. 15 Average void ratio and standard deviation

検討中である。

ところで軸応力、軸変位関係に着目すると、ピーク強度付近に近づくと、いわゆるノコギリ歯状現象がはげしくなるが、この点を間ゲキ比分布形状の変化と対比させてみると、ノコギリ歯状現象が現われてくる頃から分布形状の変化がはげしくなり、さらに間ゲキ比範囲も大きく、標準偏差の増加が著しくなってくる。このことは球状粒子を用いた応力、ヒズミ曲線のノコギリ歯状現象が供試体内の微視的なブリッジの形成と崩壊に起因するものであることを示すものと考えられる。

## 5. ま と め

粒状土の応力・変形関係を求めるため、それらが個々の粒子の集合体であるという基本的立場に立脚し、アルミ丸棒の二次元積層体によりセン断現象を検討した。粒状体のセン断変形を規定するものとして、粒子間隔の変化、粒子の相対回転、粒子自身の回転および以上の3つの要因と力との関係を取りあげる必要があるが、本文では試験の都合上、力との関係を省略し（それに代るものとして、巨視的量としての応力・ヒズミ関係は示したが）、次のような点が明らかになった。

- (1) 均一径の規則的配列では幾何学的配列より定まる一つの面上の変形を幾何学的に考察することより、その変形特性を知ることができる。
- (2) 一般の粒子配列では、スベリ領域ではいわゆるスベリ方向と粒子移動方向とは約 $20^\circ$ 程度(この角度は種

々の条件によって変化するものと考えられる)の差がある。

(3) スペリ領域において、ピーク強度付近では粒子間接触角の分布はいわゆるスペリ方向と約 20°程度傾いた方向に卓越し、この方向は粒子移動方向とほぼ一致する。さらにこの粒子間接触角の分布はセン断とともに一定のパターンで変化するように考えられる。

(4) スペリに関係しない領域では、たとえ粒子の移動距離が大きくとも、粒子自身の回転は小さい。一方、スペリ領域では移動距離が小さくとも粒子自身の回転は比較的大きく、セン断とともにその回転量は増加していく。

(5) Dead Zone を除いた供試体内の間ゲキ比分布はセン断とともにほぼ正規分布で近似できる形状を保ちながら変化し、平均間ゲキ比および標準偏差は次第に増加し、ピーク強度付近ではほぼ最大値をとるようなパターンで変化する。

(6) 球状粒子を用いた応力・ヒズミ曲線のノコギリ歯状現象は供試体内の微視的なブリッジの形成と崩壊に関係する。

粒状土の真の応力・変形関係を求めるには以上のような点を考慮した上での解析が必要である。現在そのような解析に着手している段階であるが、実際の砂礫に関する実験結果と対比させて、いわゆる微視的特性

と巨視的特性との相関を考えて今後検討する予定である。

#### 謝 辞

粒状体に関する一連の研究にあたって、日頃御指導頂いている九州大学工学部山内豊聡教授ならびに種々有益な助言を頂いている本学部伊勢田哲也教授に感謝の意を表します。なお実験データの整理に協力頂いた本学部学生黒岩俊一、宮崎集二両君にも感謝します。

#### 参 考 文 献

- (1) Roscoe, K. H. et al : On the Yielding of Soils, Geotechnique, Vol. 8, No. 2, P. 22~53, (1958), 他
- (2) Hideki Ohta. et al : On the State Surface of Soils, Proc. of JSCE, No. 172, P. 97~117, (1969). 他
- (3) Rowe, P. W. : The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, Proc. Roy l Soc. Lo don, A. Vol. 269, P. 500~527, (1962). 他
- (4) 松岡元, 他 : 微視的観点から誘導した土の応力-ひずみ関係について, 第 7 回土質工学研究発表会講演集, P. 177~180, (1972), 他
- (5) 小田 匡寛 : 砂の変形にともなう構造変化に関する研究, 第26回土木学会年次学術講演会講演集, 第3部, P. 45~48, (1971).