

# アルミニウム丸棒積層体の一面せん断試験 —ひずみの分布と発達—

清水 正喜\*・岩成 敬介\*・中村 仁秋\*\*

\*土木工学科・\*\*(株)西洋環境開発

## Direct Shear Box Tests on Aluminium Rods —Analysis of Strain Fields—

by

Masayoshi SHIMIZU\*・Keisuke IWANARI\*・Masaaki NAKAMURA\*\*

\*Department of Civil Engineering

\*\*Seiyo Environment Development, Co. Ltd.

### Abstract

Direct shear box tests were carried out on the specimens of aluminium rods; rods of 1.6mm in diameter and ones of 3.0mm were mixed in prescribed proportions. Fundamental shear characteristics such as shear strength and macroscopic stress-deformation relationships were investigated. The strain fields were also analyzed from the displacement fields which were measured on photographs of specimens. The development of strain fields is discussed by comparing the fields with the macroscopic shear behavior.

It is shown that:

- 1) The progressive development of shear strain was observed;
- 2) The shear and volumetric strains develop not only on the boundary plane between upper and lower shear boxes but also on the inclined planes that start from the ends of the boundary plane;
- 3) While shear stress is less than its peak, strains tend to localize in the end zones of the boundary plane;
- 4) After the peak, strain increments develop almost uniformly on the boundary plane; and
- 5) Thus, the shearing on one plane can be realized only after the peak shear stress.

Key words : Direct shear box test, Aluminium rods, Progressive failure, Strain field, Shear strength

## 1. はじめに

地盤と各種構造物基礎の相互作用を調べる目的で、地盤をアルミニウム丸棒積層体でモデル化した2次元模型実験を行うことが多い。著者らも、アルミニウム丸棒積層体地盤の2次元載荷試験を行い、浅い基礎底面の凹凸形状と地盤の変形支持力特性を検討している<sup>1)</sup>。そのような模型実験の結果を解釈するに当たり、アルミニウム丸棒積層体の基本的なせん断特性を把握する必要がある。

基本的なせん断特性は、2次元要素試験を通して明らかにされる。2次元要素試験として、一面せん断試験の重要性が近年再認識されつつあり、それに伴って同試験の問題点を解明することが重要な課題になっている。

本研究は、アルミニウム丸棒に対して一面せん断試験を行い、アルミニウム丸棒積層体の基本的なせん断特性を把握するとともに、一面せん断試験の問題点について考察する目的で行ったものである。

この報告では、使用したアルミニウム丸棒の詰まり方の特性、巨視的強度・変形特性、ひずみ分布の測定方法と結果について述べ、巨視的強度・変形特性と微視的ひずみの発達状況の関係について考察する。

## 2. 実験

### 2.1 アルミニウム丸棒

直径1.6mmと3.0mmの2種の径のアルミニウム棒を使用した。長さはいずれも50mmである。棒の端面が平坦になるように、また曲がりがないように特注した。

予備実験として、2種の棒の混合割合と詰まり方(間隙比)の関係を調べた。アクリル板で作製した容器に混合割合を変化させて棒を詰め、上載荷重を加えない状態で間隙比を測定した。内寸法114.5×800×500(mm)及び149.9×800×500(mm)の2つの容器を使用した。結果は後述する。

### 2.2 せん断試験

#### (1) せん断試験装置

改良型一面せん断試験装置を用いた。改良型試験装置

では、せん断応力が増加してもせん断箱が回転しないように工夫されている。せん断箱はアルミニウム丸棒が入るように設計、作製した。アルミ棒のせん断状況が目で確認できるように、片側(正面側;113.8×44.2mm)をくりぬいてある。

#### (2) せん断試験の方法

せん断箱に、所定の混合割合のアルミニウム丸棒を敷き詰め、所定の垂直荷重を静かに加えて圧密した。圧密後、垂直応力一定の条件でせん断した。せん断速度は1mm/min程度であり、水平変位が7.0mmになるまで行った。せん断力、水平変位、垂直変位を測定した。

### 2.3 ひずみの解析方法

いくつかの代表的なケースについて供試体内部のひずみを解析した。写真を撮影し、写真から変位分布を計測、変位分布に基づいてひずみ分布を求めた。

#### (1) 変位分布の測定

せん断開始から水平変位(d)0.5mmごとに供試体を側面から写真撮影した(図1に写真撮影した例を示す参照)。カメラの位置は固定した。変形前の供試体領域を縦10、横21、計210の4角形要素に分割した。要素の頂点に位置するアルミ棒の座標を写真上でデジタイザーを用いて読み取った。

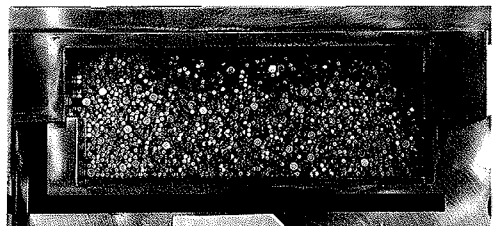
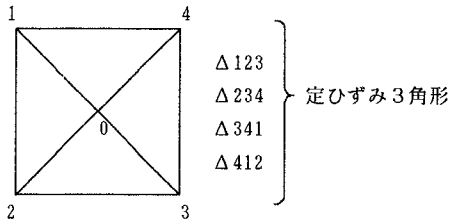


図1：供試体の写真の1例(ゆる詰めの場合)

#### (2) ひずみの解析

各4角形要素を2本の対角線で区切ると、4つの大3角形ができる(図2参照)。大3角形内でひずみが一定になるような変位の内挿関数を用いて、頂点の変位からひずみを決定した。

ひずみの分布は、4つの小3角形単位で調べた。小3角形のひずみは重複する2つの大3角形のひずみの平均



$$\epsilon (\Delta 120) = \{ \epsilon (\Delta 412) + \epsilon (\Delta 123) \} / 2$$

図2：小3三角形のひずみの求め方

として求めた。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 混合割合と詰まり方

図3に、2種の棒の混合割合と間隙比の関係を示した。この結果から、 $\phi 1.6\text{mm}$ と $\phi 3.0\text{mm}$ を重量比で85:15、本数比で19.9:1に混合した場合（「ゆる詰め」と称する）と、 $\phi 1.6\text{mm}$ のみを使用した場合（「密詰め」）に対してせん断試験を行った。図3からゆる詰めの間隙比は約0.23、密詰めの間隙比は約0.15になることがわかる。

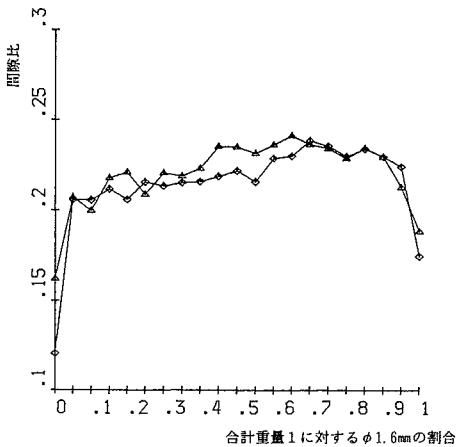


図3：混合割合と間隙比の関係

#### 3.2 巨視的せん断特性

##### (1) 強度特性

図4にせん断応力のピーク値と垂直応力の関係を示す。これらの図から、せん断抵抗角を求めることができ、ゆる詰めの場合、 $\phi_D = 26.5^\circ$ 、密詰めの場合 $\phi_D = 29.0^\circ$ と決定できた。

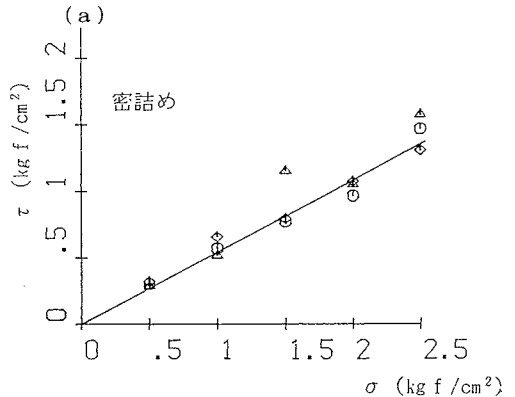
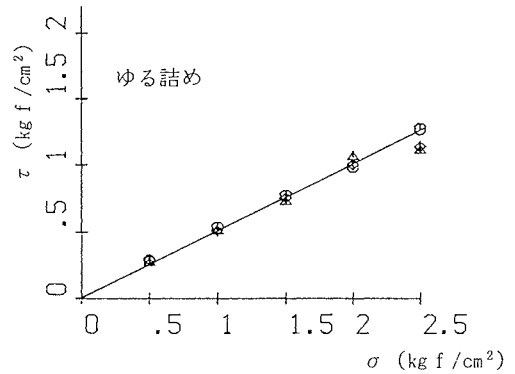


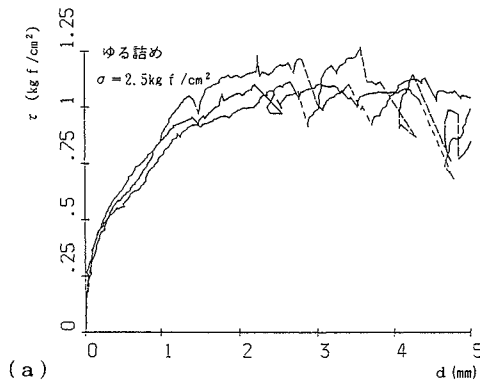
図4：ピーク時のせん断応力と垂直応力の関係：  
(a) ゆる詰め；(b) 密詰め

##### (2) せん断応力・鉛直変位～水平変位の関係

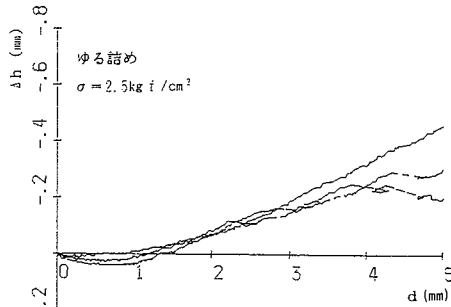
図5と図6に、代表的なせん断応力および鉛直変位と水平変位の関係を示す。図5はゆる詰め、図6は密詰めの場合である。

これらの図より

①同じ詰め方であっても、供試体によってせん断挙動の細部に違いが見られる。すなわち、結果の再現性がある



(a)



(b)

図5：ゆる詰めの巨視的せん断挙動 ( $\sigma = 2.5 \text{ kgf/cm}^2$ )(a) せん断応力 $\tau$ -水平変位 $d$ 関係(b) 鉛直変位 $\Delta h$ -水平変位 $d$ 関係

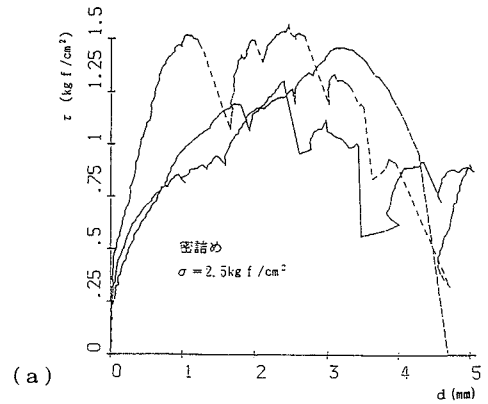
りよくない。特に、密詰めに於いて再現性が悪い。

②いずれの詰め方においても、鉛直変位は、せん断初期にわずかに圧縮傾向を示し、せん断の進行とともに膨張に転じている。膨張に転じるときの水平変位は、ゆる詰めの方が密詰めに比べて大きい傾向がある。

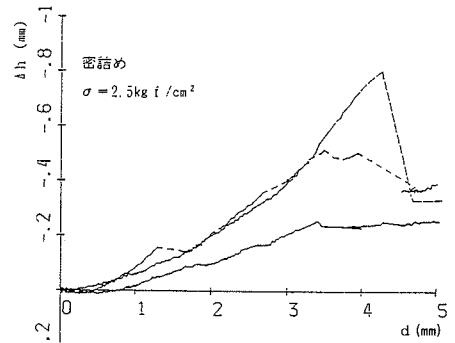
③いずれの詰め方においても、せん断応力はピークを過ぎた頃から非常に複雑な挙動をしている。粒径の大きいガラスビーズなどに見られるような、振動現象 (stick-slip現象) が見られる。特に、密詰めの場合、振幅が大きい。

### 3. 3 粒子の変位とひずみの分布

ひずみの解析を行ったケースの内、ゆる詰めで $\sigma = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の場合について、粒子変位とひずみの解析結果を示す。



(a)



(b)

図6：密詰めの巨視的せん断挙動 ( $\sigma = 2.5 \text{ kgf/cm}^2$ )

(a) せん断応力-水平変位関係

(b) 鉛直変位-水平変位関係

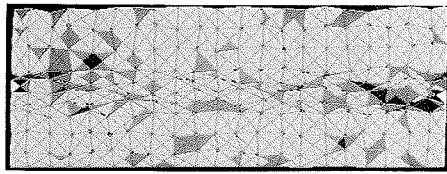
なお、ここに示す結果に対応した巨視的せん断挙動を図7に示す。巨視的せん断挙動とひずみ場の関係を考察するのに利用する。

図7において、 $\tau$ は $d = 2 \sim 4 \text{ mm}$ 付近でピークに達し、その後振動しながら減少している。鉛直変位は、せん断初期 ( $d < 1 \text{ mm}$ ) にわずかに圧縮傾向を示すものの、その後膨張を続け大きな変位 ( $d > 6 \text{ mm}$ ) で一定になる傾向がみられる。

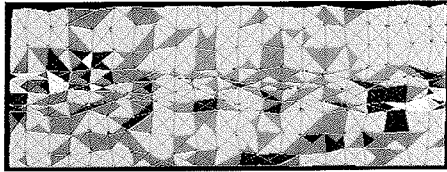
#### (1) 粒子の変位

図8に、 $d = 0 \sim 7 \text{ mm}$ における粒子の変位軌跡を示す。

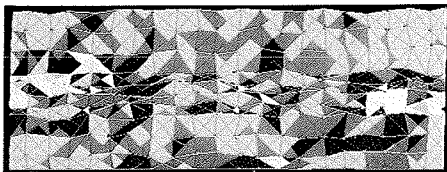
理想的な一面せん断試験を想定すると、各せん断箱内の試料が剛体的に変位し、上下の境界面の凹凸に起因するダイランシーによって下箱内の試料は鉛直下方に一樣に変位し、上箱内の試料は水平に一樣に変位すると考



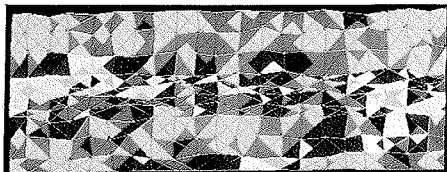
(a)  $d = 1 \text{ mm}$



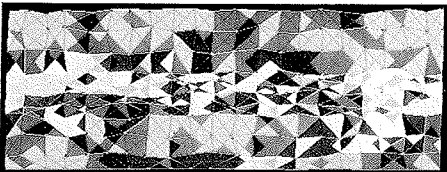
(b)  $d = 2 \text{ mm}$



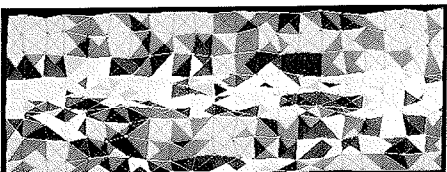
(c)  $d = 3 \text{ mm}$



(d)  $d = 4 \text{ mm}$



(e)  $d = 5 \text{ mm}$



(f)  $d = 6 \text{ mm}$



(g)  $d = 7 \text{ mm}$

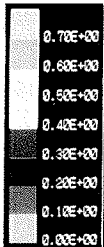
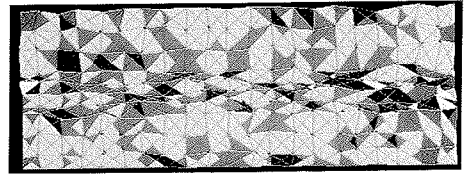
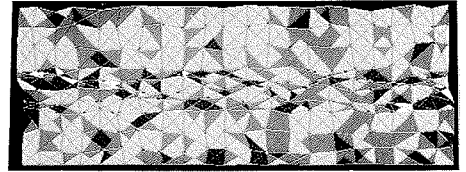


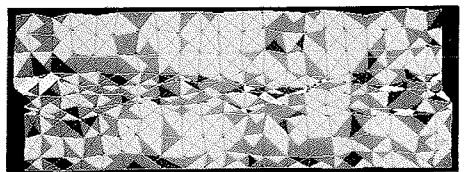
図9：最大せん断ひずみの分布



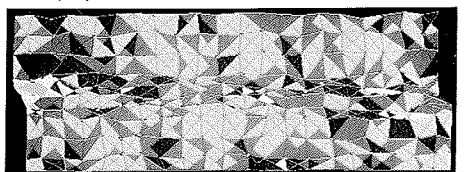
(a)  $0.5 \leq d \leq 1.0 \text{ mm}$



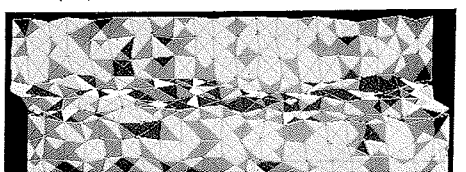
(b)  $1.5 \leq d \leq 2.0 \text{ mm}$



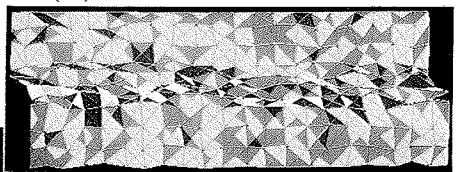
(c)  $2.5 \leq d \leq 3.0 \text{ mm}$



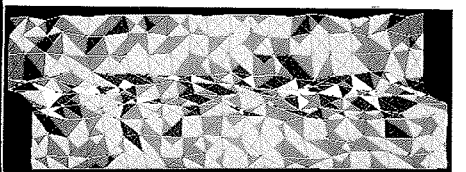
(d)  $3.5 \leq d \leq 4.0 \text{ mm}$



(e)  $4.5 \leq d \leq 5.0 \text{ mm}$



(f)  $5.5 \leq d \leq 6.0 \text{ mm}$



(g)  $6.5 \leq d \leq 7.0 \text{ mm}$

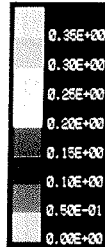


図10：最大せん断ひずみ（増分）の分布

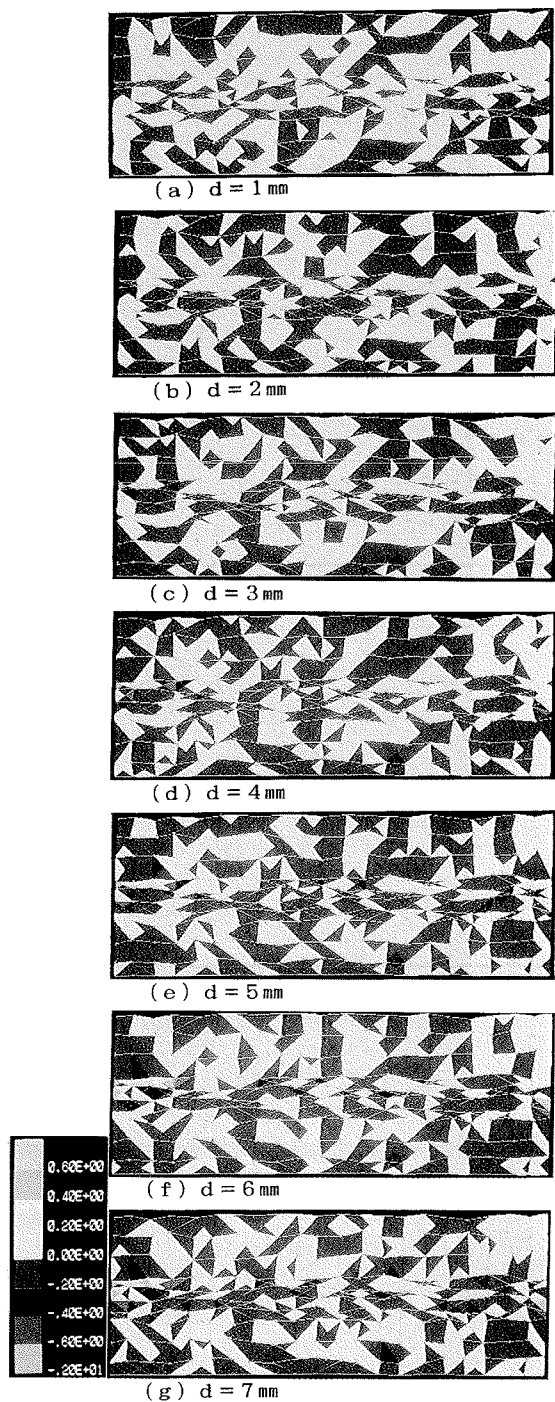


図11：体積ひずみの分布

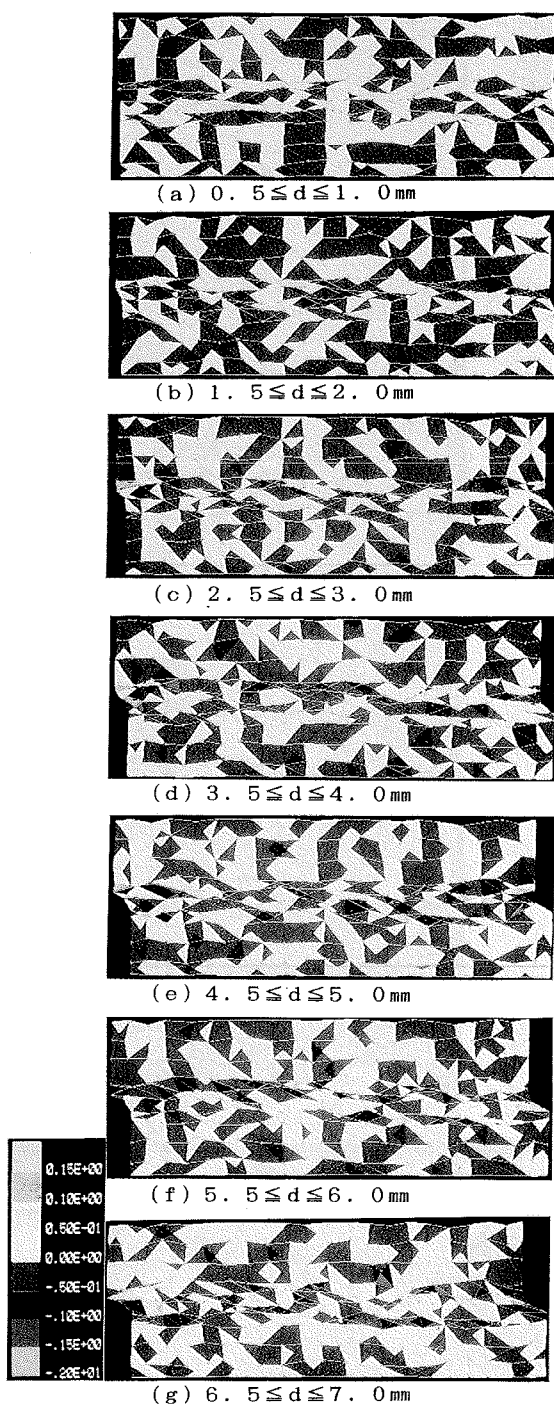
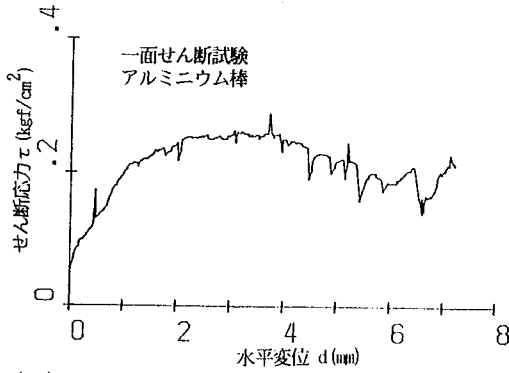
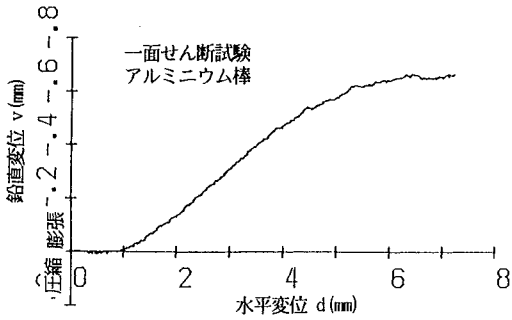


図12：体積ひずみ（増分）の分布



(a)



(b)

図7：変位およびひずみの解析を行ったケースの巨視的せん断挙動（ゆる詰め， $\sigma = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ ）

- (a) せん断応力-水平変位の関係
- (b) 鉛直変位-水平変位の関係

えられる。

ところが，図8に示すように，実際の変位分布はかなり複雑である。上部せん断箱上面の粒子はほぼ水平に変位しているが，上下せん断箱境界面付近で側面に近い部分の粒子は斜め下方あるいは上方に移動している。また，底面付近の粒子は鉛直下方に卓越した動きをしている。

(2) ひずみの分布と発達状況

図9 (a) ~ (f) に，水平変位  $d$  をパラメータにして，最大せん断ひずみ ( $\gamma_{\text{max}}$ ) の分布を示す。図10 (a) ~ (f) に  $d$  の増分 1 mm に対応する最大せん断ひずみ増分の分布を示す。

図9より，

- ① 水平変位  $d$  が小さいとき ( $d \leq 2 \text{ mm}$ ) は，せん断ひずみは，上下せん断箱境界面の左右端付近で生じている。
- ②  $d$  が大きくなるにつれて ( $d \geq 4 \text{ mm}$ )，境界面に沿ってひずみが発達し始める。それと同時に，
- ③ 境界面右端から下箱底面中央に向かう面に沿ってもひずみが発達している。
- ④ さらにひずみが大きくなると，下箱底面中央と境界面左端を結ぶ面に沿ってもひずみが発達する傾向が見られる。

図10の結果は，図9の結果を別の観点からみたものであるが，とくに

- ⑤  $d \leq 2 \text{ mm}$  のときひずみ増分が境界面左右端付近に生じ，
- ⑥  $d \geq 5 \text{ mm}$  になると，境界面全体にわたって大きなひずみ増分が生じている。

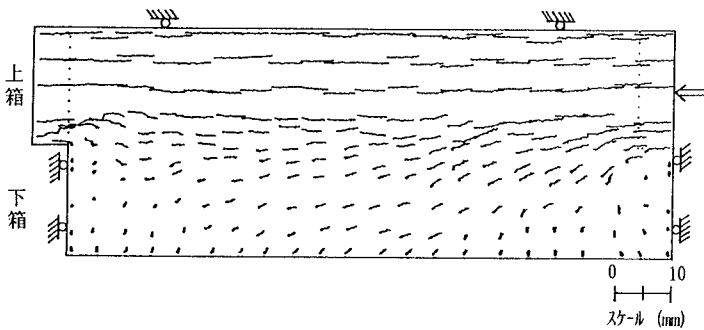


図8：粒子変位の軌跡 ( $d = 0 \sim 7 \text{ mm}$ )

図7で指摘したように、 $d \leq 2 \text{ mm}$ では、せん断応力はまだピークに達しておらず、硬化中である。このことと上の①、⑤の観察を考え合わせると、せん断応力の増加は、ひずみの局所的発達課程にみられる、といえる。

一方、 $d \geq 2 \text{ mm}$ は、せん断応力がピークに達し、軟化に至る過程であり、観察②～④、⑥から、最大せん断抵抗が発揮された以後の過程では、ひずみが境界面全面にわたって発達するといえる。

図11、図12に、水平変位 $d$ をパラメータにして、体積ひずみとその増分の分布を示す。これらの図から体積ひずみとその増分の発達と巨視的せん断挙動を比較する：

⑦図9または図10でみられたせん断ひずみの発達域において顕著な体積の膨張がみられる、

⑧体積が膨張する要素の近傍には体積が圧縮する要素があり、体積変化は一様でない、

ことが観察できる。

#### 4. 結論

せん断応力がピークに達するまでの過程では、上下せん断箱境界面の端部においてのみひずみが発達し、水平変位がさらに大きくなってせん断応力がピークまたはピークを過ぎてはじめて境界面上全面にひずみが発達し、“一面せん断”の状況が現れる。さらに、大变位の時に、せん断ひずみは、境界面以外の、境界面端点から下方に延びる面に沿っても生じる傾向がある。

ここで示した手法で、一面せん断試験におけるひずみの発達状況かなり明らかにできることがわかった。今後、より細かいアルミ棒を用いた試験に対しても解析を行い、実際の土の挙動を推測したい。

#### 参考文献

- 1) 清水, 北川, 前田(1991):直接基礎の支持力に対する基礎底面凹凸形状の影響, 第43回土木学会中国四国支部研究発表会