

## 規則的繰返し応力を受ける乾燥砂の体積変化\*

鈴木輝之\*\*

(昭和56年9月28日受理)

### Volumetric Strain of Dry Sand Subjected to Constant Amplitude Cyclic Stress

by Teruyuki SUZUKI

The accumulation of volumetric strain under cyclic stress is one of the important properties of soil associated with the liquefaction or settlement of sand deposits during earthquakes. The purpose of this study is to clarify the characteristics of cumulative volumetric strain of relatively loose sand subjected to cyclic stress.

In the case of sand specimens prepared with an established method, it is considered that the important factors affecting the volume change under cyclic stress are: (1) cyclic mobilized angle of internal friction on both the compression and extension sides. (2) amount of stress applied. (3) initial relative density of the specimen. In this paper, it is confirmed that as a function of these factors, an experimental formula to calculate the volumetric strain of sand subjected to constant amplitude cyclic stress can be derived, and this derived formula can successfully represent the measured volume change in the sand specimen.

#### 1. ま え が き

繰返しせん断応力の下での砂の変形は、地震時における飽和砂地盤の液状化、機械基礎の変形、交通荷重による路床、路盤の沈下などに関連し工学的には重要な性質の1つである。特にSeed<sup>1)</sup>らによって飽和砂の液状化現象をせん断試験機内で再現する手法が開発され、さらにそれと前後して新潟地震において地盤の液状化による大きな災害が発生したことを機にして、砂地盤の液状化特性を明らかにする目的で、砂に何らかの方法で繰返し応力を加え、そのときの変形あるいは強度特性を調べるための研究が多く行なわれるようになった。

繰返し応力を受ける砂の変形、強度特性に影響する要素は多数あり、個々の要素の影響の現われ方についてはかなり明らかになっている。しかし、これらの要素が組合わさった形でのように変形あるいは強度に影響してくるかを表わす構成式を提案した例は未だ見受けられな

\* 第33回土木学会年次学術講演会にて一部発表

\*\* 土工学科

い。本研究は飽和砂の液状化特性を明らかにするための基礎的研究として、規則的繰返しせん断応力を受けるときの乾燥砂の体積変化を繰返し三軸試験装置によって調べたものである。本報告では、所定の方法によって作製された砂供試体が規則的繰返しせん断応力を受けるときの体積変化は、繰返し動員まさつ角、初期相対密度、載荷回数によって決まってくることを述べ、これらの間に成立する実験式を示した。

## 2. 実験内容

### 2.1 試料および実験装置

用いた試料は豊浦砂であり、粒子表面の粉末分を取り除くため一度水洗いした後 50~60°C の温度で炉乾燥した。水洗い後の試料の物理的性質は比重  $G_s=2.65$ ，最大，最小間げき比は各々  $e_{max}=0.985$ ， $e_{min}=0.617$  である。供試体の形状は直径 50 mm，高さ 115 mm の円柱形であり、その両端には端面まさつの除去を目的として、シリコングリースを塗布した厚さ 0.2 mm のゴム膜を敷いた。また供試体が接するキャップおよびペDESTALの直径は供試体直径より 5 mm 大きくし、55 mm とした。

供試体の作製は多重ふるい落下装置により行なった。供試体初期相対密度  $D_r$  の目標値は 45~60% の間で 5% 間隔に設定した。この値は実際の砂地盤において液状化が問題となるときの  $D_r$  に合わせたものである。 $D_r$  の目標値からのばらつきは  $\pm 2\%$  を許容範囲としたが、全供試体の 7 割は、 $D_r$  のばらつきが  $\pm 1\%$  以内に収まった。

実験装置は電磁弁の切換え方式による繰返し三軸試験機であるが、その詳細は別報<sup>2)</sup>に譲る。

### 2.2 実験ケース

荷重載荷法とモールの応力図を図-1 に示す。同図中に示す  $\sigma$ -時間関係で、実線は軸方向応力を、破線は半径方向応力を表わしている。この図から分るように、すべての実験は等方応力  $\sigma_0$  (2.0 kg/cm<sup>2</sup> に固定) から出発し、半径方向応力一定の状態では軸方向応力だけを圧縮側と伸張側の両方、あるいはどちらか一方に変化させる載荷法を用いている。これら 3 種の試験のうち、C 試験と E 試験のよな場合はせん断応力の方向が交番しないことから片振

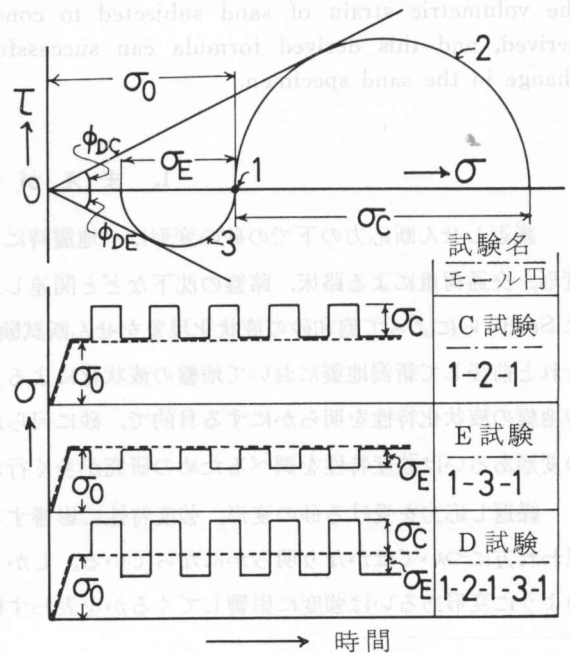


図-1 応力の加え方

り試験とも呼ばれ、これに対してD試験のような場合はせん断応力の方向が交番するので両振り試験とも呼ばれる。本文においても必要に応じてこの表現を用いる。

繰返し応力の大きさは、図-1に示す圧縮側および伸張側での動員まさつ角 $\phi_{DC}$ 、 $\phi_{DE}$ の大きさと規定し、C、E試験では $10^\circ \sim 25^\circ$ 、D試験では $10^\circ \sim 30^\circ$ の間で $5^\circ$ 間隔に実験を行なった。このときD試験では常に $\phi_{DC} = \phi_{DE}$ となるように $\sigma_C$ 、 $\sigma_E$ の大きさを調整した。なお以後において、 $\phi_{DC}$ と $\phi_{DE}$ は特に区別の必要がない場合はまとめて $\phi_D$ で表わし、さらに繰返し応力の大きさは $\tan \phi_D$ で表わすことにする。また載荷周期は1サイクル10秒とし、30サイクルまで載荷した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 体積変化に影響する要素および解析方法

以下において乾燥砂が図1に示すような繰返し応力を受けるときに生じる体積ひずみについて検討するが、ここで言う体積ひずみ $\varepsilon_{vp}$ は、繰返し応力が除荷された時点で測定される塑性的残留体積ひずみの累積値を指している。この $\varepsilon_{vp}$ に影響する要素としては、繰返し応力の大きさ、初期拘束圧、繰返し応力の載荷径路、載荷回数、供試体密度、供試体初期堆積構造(供試体作製法)などが挙げられる。ここで繰返し応力の大きさを動員まさつ角で表わせば、初期拘束圧と応力載荷径路の影響は小さなものになることが分っている<sup>3)</sup>。このことから、本実験では、初期拘束圧 $\sigma_0$ を $2.0 \text{ kg/cm}^2$ で固定し、載荷径路は最も実験の行ないやすい、軸方向応力のみを繰返す方法を採用している。つぎに供試体初期堆積構造の違いは、その作製方法の違いによって現われてくるものである。この影響は最近になって明らかにされたことであるが、これを定量的に表わすことは現在のところ不可能である<sup>4),5)</sup>。したがってここでは、多重フルイ落下装置によって作製された供試体における議論であるという限定を設ける。しかし供試体の作製方法が変わっても、本文中で導いていく式の常数が変化するだけであり、式の形が変わるということはないと考えられる。

以上の前提に基づけば、繰返し応力の下での砂の体積ひずみ $\varepsilon_{vp}$ は、繰返し動員まさつ角 $\phi_D$ 、載荷回数 $n$ 、供試体初期相対密度 $D_r$ の関数として表わされることになる。

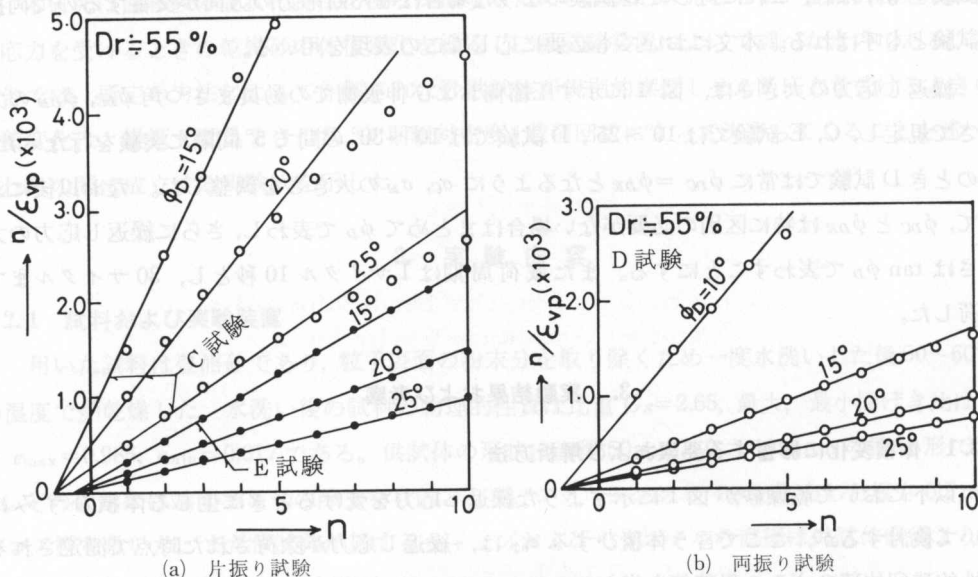
#### 3.2 $\varepsilon_{vp}$ と $n$ の関係

規則的繰返しせん断応力の下での体積ひずみ $\varepsilon_{vp}$ と載荷数 $n$ との関係式として、次式が八木<sup>6)</sup>によって提案されている。

$$\frac{\varepsilon_{vp}}{n} = a + bn \quad (1)$$

ただし $a$ 、 $b$ は常数

(4)式に基づいて本実験で得られた $n/\varepsilon_{vp}$ と $n$ の関係をプロットしてみると図-2のようになる。ただしここでの $\varepsilon_{vp}$ は小数で表わしている。図-2によれば本実験の結果においても(1)式の成

図-2  $n/\epsilon_{vp}$  と  $n$  の関係

立することが確かめられる。しかし同時に (1) 式が成立する  $n$  の値に限界があることも認められる。同様な結果は、大岡ら<sup>7)</sup>、北郷ら<sup>8)</sup> によっても示されており、(1) 式の成立する  $n$  の限界について、大岡らはリングねじりせん断試験で 5 回、北郷らは三軸両振り試験で 30 回であったと報告している。これに対して、本実験の結果を詳細に検討したところでは、この  $n$  の限界は  $\tan \phi_D$  大きさによって変化し、 $\phi_D = 10^\circ$  で 5 回、 $\phi_D = 25^\circ$  で 20 回程度であることが認められた。実際の地震波では、液状化に参与するような主要動の波数は高々 10 波程度であるとされていることを考えれば、(1) 式は地震荷重を対象とした地盤の液状化挙動の推定には十分用い得るとして良いであろう。以上のことから、本実験では  $n = 30$  回まで載荷しているが、解析は  $n = 10$  回までの  $\epsilon_{vp}$  について行なうこととする。

図-2 からもう 1 つ分ることは、各直線が  $n$  軸上の 1 点に集中していることである。この集中点は、C 試験と D 試験で  $n = -1.0$ 、E 試験で  $n = -0.5$  となっている。またこれらの値は  $Dr$  の大きさによらないことが別途確かめられている。このように  $n/\epsilon_{vp} - n$  直線が  $n$  軸上の 1 点に集中することは土岐<sup>9)</sup> によっても確かめられており、土岐らは、集中点の  $n$  の値は片振り試験で  $n = -0.8$ 、両振り試験で  $n = -2.0$  と報告している。いずれにしても  $n/\epsilon_{vp} - n$  直線が集中する  $n$  軸上の値は、載荷方法が決まれば  $Dr$ 、 $\tan \phi_D$  にかかわらず定まる定数として良さそうである。ここでこの  $n$  軸上の点の座標の絶対値を  $k$  とおくと、(1) 式の常数  $a, b$  の間には次式の関係が成立する。

$$a = k \cdot b \quad (2)$$

さらに (2) 式を (1) 式に代入することにより次式が得られる。

$$\epsilon_{vp} = \frac{n}{(k+n)b} \quad (3)$$

(3)式の常数  $b$  は  $\tan \phi_D$  と  $D_r$  に支配されるから、以後において3者の関係を求めていく。

### 3.3 $b$ と $D_r$ , $\tan \phi_D$ の関係

いま常数  $b$  と  $\tan \phi_D$  の関係を、 $D_r$  をパラメータとして両対数紙上にプロットしてみると図-3が得られる。この図から各  $D_r$  の値毎に次式の成立することが分る。

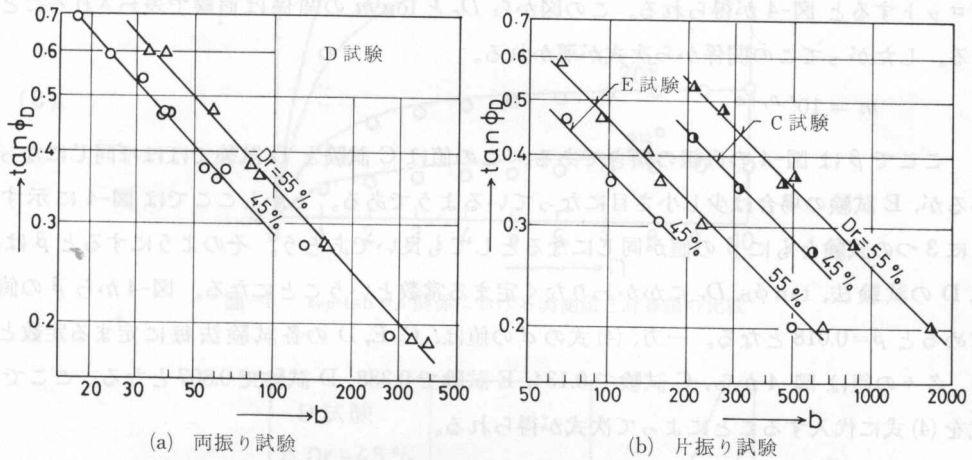


図-3 常数  $b$  と  $\tan \phi_D$  の関係

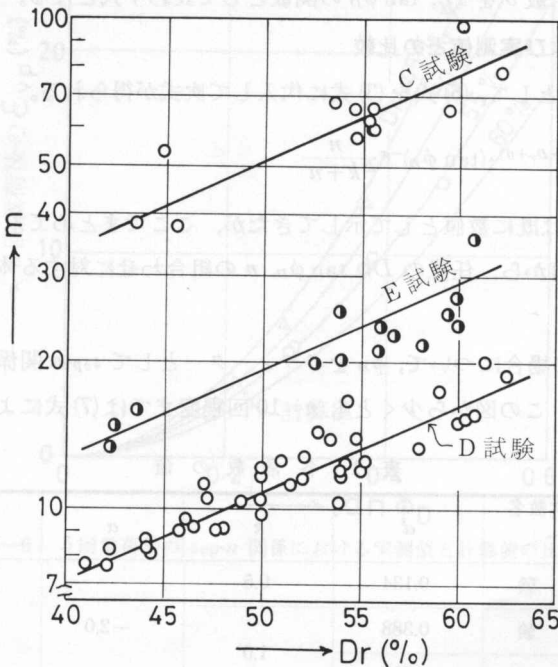


図-4 常数  $m$  と  $D_r$  の関係

$$b = m (\tan \phi_D)^\alpha \quad (4)$$

(4)式で $\alpha$ の値は図-3の直線の傾きとなり、図からこの値を求めるとD試験で $\alpha = -1.985$ 、C、E試験で $\alpha = -2.120$ となる。このように $\alpha$ の値は両振り、片振りの载荷法によらずほぼ同じ値となることが分かったので、以後の計算ではこれらをまとめて $\alpha = -2.0$ とする。

つぎに(4)式の $m$ は $D_r$ によって変わる値であるから、実測された $\tan \phi_D$ と $b$ の値を(4)に代入し、さらに $\alpha = -2.0$ として各実験ケース毎に $m$ の値を逆算し、その値を $D_r$ に対してプロットすると図-4が得られる。この図から $D_r$ と $\log m$ の関係は直線で表わされることが分る。したがってこの関係から次式が導かれる。

$$m = 10^{\beta \cdot D_r + d} \quad (5)$$

ここで $\beta$ は図-4の直線の傾きである。この値はC試験とD試験ではほぼ同じになっているが、E試験の場合は少し小さ目になっているようである。しかしここでは図-4に示すように3つの試験ともに $\beta$ の値が同じになるとしても良いであろう。そのようにすると $\beta$ はC、E、Dの試験法、 $\tan \phi_D$ 、 $D_r$ にかかわらず定まる常数ということになる。図-4から $\beta$ の値を求めると $\beta = 0.018$ となる。一方、(4)式の $d$ の値は、C、E、Dの各試験法毎に定まる定数となり、各々の値は図-4から、C試験で0.134、E試験で0.388、D試験で0.807となる。ここで(5)式を(4)式に代入することによって次式が得られる。

$$b = 10^{\beta \cdot D_r + d} \cdot (\tan \phi_D)^\alpha \quad (6)$$

この(6)式が(3)式の常数 $b$ を $D_r$ 、 $\tan \phi_D$ の関数として表わす式となる。

### 3.4 $\varepsilon_{vp}$ の計算および実測値との比較

$\varepsilon_{vp}$ を計算する式として、(6)式を(3)式に代入して次式が得られる。

$$\varepsilon_{vp} = 10^{-(\beta \cdot D_r + d)} \cdot (\tan \phi_D)^{-\alpha} \cdot \frac{n}{k+n} \quad (7)$$

(7)式における各常数は既に数値として示してきたが、ここでまとめてみると表-1のようになる。(7)式と表-1の値から、任意の $D_r$ 、 $\tan \phi_D$ 、 $n$ の組合わせに対する体積ひずみ $\varepsilon_{vp}$ を計算することができる。

図-5はD試験の場合について、 $\phi_D$ をパラメーターとして $\varepsilon_{vp}$ - $n$ 関係の実測値と計算値を比較したものである。この図から少なくとも $n=10$ 回程度までは(7)式によって計算された $\varepsilon_{vp}$ - $n$

表-1 各 常 数 の 値

常数名 試験名	$d$	$k$	$\alpha$	$\beta$
C 試 験	0.134	0.5	-2.0	0.018
E 試 験	0.388	1.0		
D 試 験	0.807			



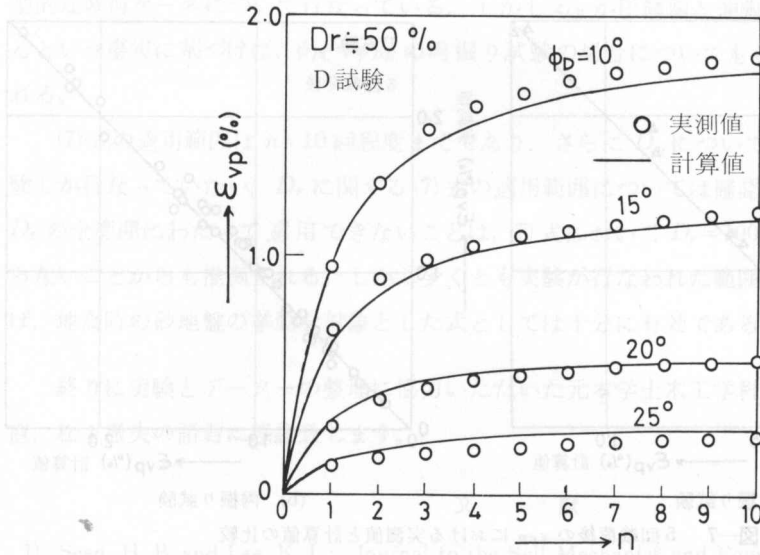


図-5  $\epsilon_{vp}-\tan \phi_D$  関係における実測値と計算値の比較

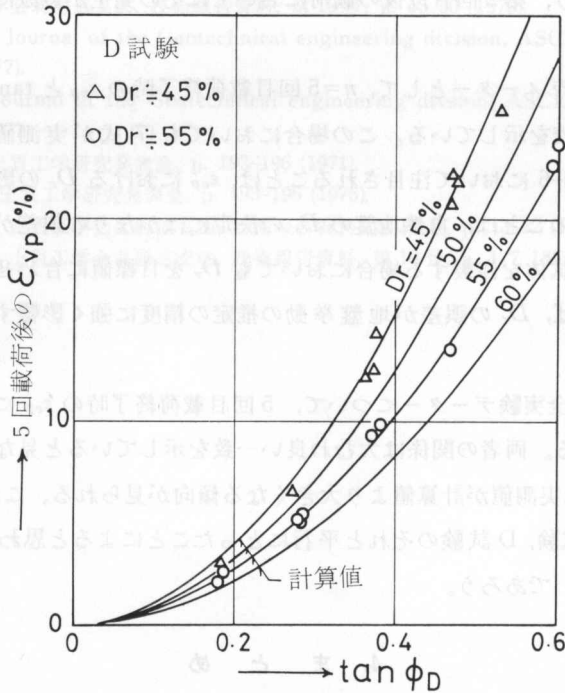


図-6 5回載荷後の  $\epsilon_{vp}-n$  関係における実測値と計算値の比較

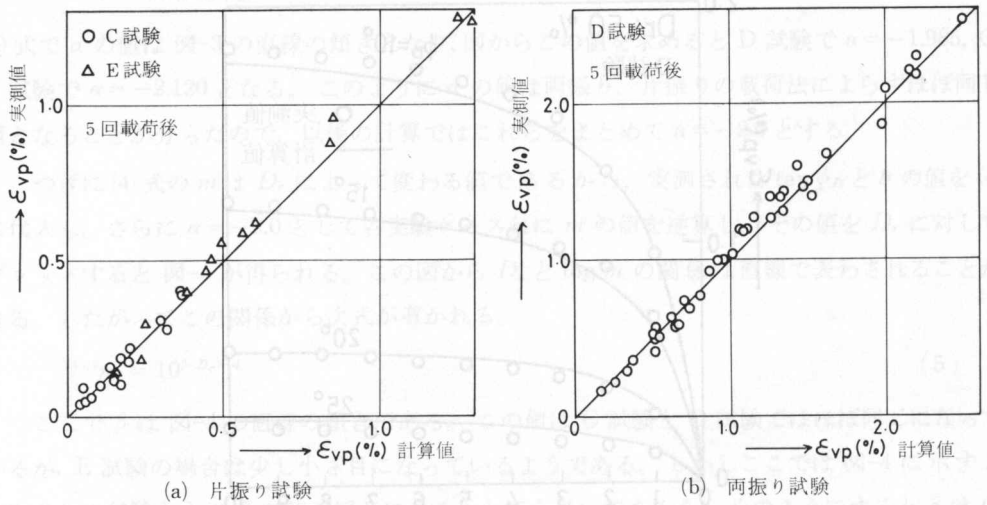


図-7 5回載荷後の  $\epsilon_{vp}$  における実測値と計算値の比較

関係が実測値と良く一致していると言えよう。また図-5から  $\epsilon_{vp}$  は第1回目の載荷においてその発生が顕著であり、第2回目以後の載荷においてはその発生が急激に減少していくことが分る。

図-6は  $D_r$  をパラメーターとして、 $n=5$  回目載荷終了時の  $\epsilon_{vp}$  と  $\tan \phi_D$  の関係における実測値と計算値の比較を示している。この場合においても(7)式が実測値を良く表わしていることが分る。また図-6において注目されることは、 $\epsilon_{vp}$  における  $D_r$  の影響がかなり大きいということである。このことは、自然地盤の  $D_r$  の決定にはかなりの誤差が見込まれること、さらに乱した試料で供試体を作製する場合においても  $D_r$  を目標値に合わせることはそれ程簡単でないことを考えれば、 $D_r$  の誤差が地盤挙動の推定の精度に強く影響することを示唆していると思われる。

図-7は得られた全実験データについて、5回目載荷終了時の  $\epsilon_{vp}$  における計算値と実測値の比較を示している。両者の関係は大むね良い一致を示していると思わせるが、E試験の場合において、全体的に実測値が計算値より大きくなる傾向が見られる。これは図-4において  $\log m-D_r$  直線をC試験、D試験のそれと平行にとったことによるとと思われる。しかしこの影響は小さいと見て良いであろう。

#### 4. ま と め

これまでにおいて、規則的繰返し応力を受ける乾燥砂の累積体積ひずみ  $\epsilon_{vp}$  に影響する要素について述べ、さらにそれらの要素と  $\epsilon_{vp}$  との間の関係式を実験的に求めてきた。最終的に求められた(7)式による  $\epsilon_{vp}$  の計算値は実測値と良く一致することが確かめられた。また今回の実験は、せん断応力の方向が交番しない片振り試験と  $\phi_{DC} = \phi_{DE}$  となる両振り試験という典



