

## 排水を伴った飽和粘土の繰返し単純せん断試験

## CYCLIC SIMPLE SHEAR TESTS ON SATURATED CLAY WITH DRAINAGE

大原資生\*・松田 博\*\*・近藤泰生\*\*\*

By Sukeo OHARA, Hiroshi MATSUDA and Yasuo KONDO

We observed in the previous experiments that the pore pressure produced by the repeated shear stress is two or four times as much as the one by the static shear stress and therefore the repeated shear strength decreases in proportion to the increase of the pore pressure. So, in this experiments, the volume change which attained to an ultimate value depending on the shear strain amplitude and the pore pressure generated during cyclic shear were measured and the relations of them were investigated. As a conclusion, the volume change converted from the pore pressure increase using the coefficients of volume expansibility was a half of the one obtained in the cyclic shear tests with drainage.

## 1. 緒 言

軟弱な粘性土地盤上に築造された構造物あるいは、地中埋設物等の耐震性を検討する際には、その地盤の動的強度を知る必要がある。この動的強度は、その地盤の間隙比、過圧密比、粘着力、内部摩擦角、あるいは入力地震波の特性等によって大きく影響されることがわかっており、それらに関する研究もいくつかみられる<sup>1)~3)</sup>ものの、いまだ明らかにされていない点が多い。

著者らは以前から、これらの諸因子が動的強度に及ぼす影響について、動的単純せん断試験装置を用いて研究を進めてきている<sup>4)~6)</sup>が、粘性土の動的強度は、主として繰返しせん断中に生じる間隙水圧によって支配される、という結論を得た。

実際、粘性土に繰返しせん断を与えると、間隙水圧を発生するが、その大きさは静的せん断の場合の2~4倍程度大きいことがわかっており、このことが飽和粘土の動的強度は、一般的に静的強度より小さく<sup>4)</sup>、また繰返し回数の増大に伴って、低下することの原因と考えるこ

とができる。すなわち、静的せん断による供試体破壊時の間隙水圧は、初期有効拘束圧の20~40%であるのに対し、繰返しせん断を与えた場合には、80%にも達する。

この事実からも、粘性土の動的強度を論じる場合には、繰返しせん断中の間隙水圧の発生を予測することが、砂の液化化予測の場合と同様に重要である。

本研究は、繰返しせん断を受けた飽和粘土の間隙水圧の発生が、圧密圧力の80%にもなる機構を調べることを目的として、間隙水圧の発生が、粘土に生じるべき間隙の縮小が妨げられるためという本質的な考え方から、非排水せん断時に生じる間隙水圧と、その後の排水過程に生じる体積ひずみの関係を調べたものである。

ここで、排水条件下での体積ひずみの測定は、地震時を対象とした場合、載荷速度が大きいこと、および粘性土の透水係数が小さいこと等から困難であるが、ここでは非排水状態のもとで、ある回数、繰返しせん断を与えた後、排水を行うという操作を繰り返すことによって、繰返しせん断に伴う体積ひずみを求めた(この試験を「排水を伴った繰返しせん断試験」とよぶ)。

## 2. 排水を伴った繰返しせん断試験

## (1) 試料および供試体

実験に用いた試料は粉末状のカオリン粘土で、気乾燥

\* 正会員 工博 山口大学教授 工学部土木工学科  
(〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

\*\* 正会員 工博 山口大学助教授 工学部建設工学科(同上)

\*\*\* 正会員 工修 山口県立徳山工業高等学校

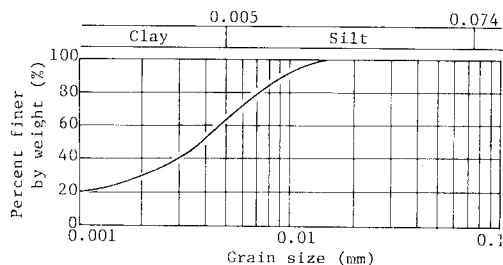


Fig. 1 Grain size distribution curve.

Table 1 Physical properties of kaolinite clay.

Specific gravity	$G_s$	2.718
Liquid limit	$w_L$ (%)	53.5
Plastic limit	$w_p$ (%)	28.5
Plasticity index	$I_p$	25.0
Average grain size	$D_{50}$	3.8 $\mu\text{m}$

状態のものである。その粒径加積曲線を Fig. 1 に、また物理的性質を Table 1 に示す。

この試料を用いて飽和状態の供試体を作製するが、その操作は次のとおりである。

まず含水比が 80 % になるように、気乾燥試料に脱気水を加えて、よく練り合わせた後、水分の蒸発を防ぎながら一昼夜放置する。その後、試料の脱気を行うが、今回は特に飽和度を高めるということを目的として、上述の試料を、真空容器を用いて脱気した。この場合、スラリー状の試料の厚さは約 3.0 cm で、真空容器をほぼ真空状態にしたうえで、軽い振動を加えつつ、約 20 分間脱気した。

このようにして得られた試料を、せん断箱のゴムスリーブの中に、3 層に分けて詰め、1 層ごとに、突き棒で突き固める。その後、上下面を排水状態にし、所定の圧密圧力で約 24 時間圧密を行う。圧密後の供試体は、直径 7.5 cm、高さ 2.0 cm の円盤状である。

なお、今回の実験では、圧密圧力を 49 kN/m<sup>2</sup>、98 kN/m<sup>2</sup>とした。それぞれの圧密後の間隙比は、1.30、1.22 である。また圧密後非排水状態で静的単純せん断試験を行った結果、 $\phi' = 15.8^\circ$ 、 $c = 1.67$  kN/m<sup>2</sup>が得られた。

## (2) 実験装置

ここで用いた実験装置は、ひずみ制御型の動的単純せん断試験機であって、Fig. 2 にせん断箱の部分を、Fig. 3 に一定の繰返しせん断ひずみ発生装置を示した。これらについては、すでに詳しく述べられている<sup>4)</sup>ので、ここでは特に、繰返しせん断ひずみ発生機構について、簡単に述べることにする。

せん断ひずみは、Fig. 3 において、装置の側面に取り付けられている、偏心ローラーおよびレバーアームによって、図中の⑥を支点としたテコの原理で、ロッドを

- ① Load Cell
- ② Top Plate
- ③ Rubber Membrane
- ④ Top Cap
- ⑤ O-Rings
- ⑥ Ring Holder
- ⑦ Plastic Rings
- ⑧ Porous Stone
- ⑨ Displacement Transducer
- ⑩ Roller Bearing
- ⑪ Horizontal Carriage
- ⑫ Pedestal
- ⑬ Linear Motion Bearing

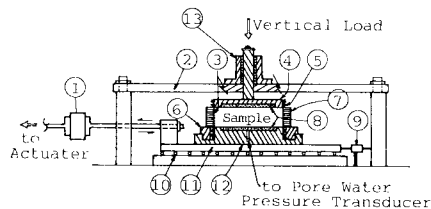


Fig. 2 Shear box of simple shear apparatus.

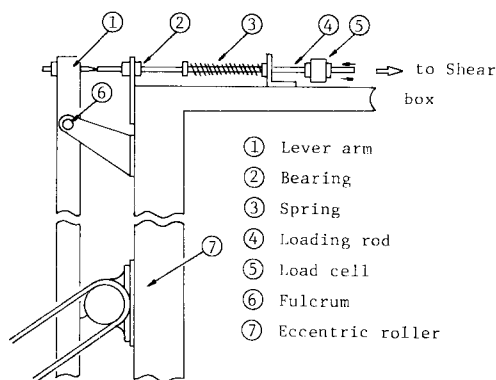


Fig. 3 Dynamic simple shear test apparatus.

通して Fig. 2 のせん断箱に伝えられる。ひずみ振幅の大きさは、ローラー⑦の位置を上下させることによって変えられ、供試体には任意の繰返しせん断ひずみ (0.1~2.0 %) を与えることができる。このようにして、供試体に与えられる繰返しせん断ひずみの波形は、ほぼ正弦波状である。また繰返しの周期は、2 秒とした。

試験中、供試体のせん断変位は、Fig. 2 において⑨の変位計で測定し、せん断応力は①のロードセルで測定を行った。また、間隙水圧は、供試体下部と圧力変換器を銅管で連結することにより測定し、鉛直変位は、トップキャップの変位量をダイヤルゲージ式の変位変換器で測定した。なお、繰返しせん断中に排水を行う場合は、供試体の上部から排水し、排水量の測定も行った。一方、圧密圧力は、トップキャップに分銅による鉛直荷重を作用させることによって与えた。そして、試験中はこれら、せん断応力、せん断変位、間隙水圧、鉛直変位を日記々録した。

## (3) 実験方法

前述したように作製された供試体に対して、バックプレッシャーを与えて、飽和度を高める。その後、所定のひずみ振幅 ( $\gamma_a = 0.33 \% \sim 1.50 \%$ ) で繰返しせん断ひ

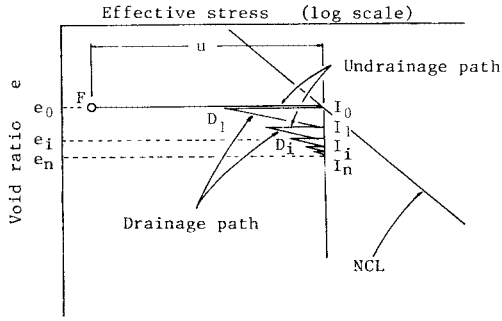


Fig. 4 Effective stress vs. void ratio relationship.

ずみを、非排水状態で ( $n_c=5$ ) 回与える。次に、供試体上面を排水状態にして圧密し、沈下量を測定するとともに、供試体底面の間隙水圧の測定を行う。発生した間隙水圧がほぼ消散した時点で、再び非排水状態にし、( $n_c=5$ ) 回の繰返しせん断ひずみを与える。そして、以上の操作を、繰返しせん断後の排水中に生じる圧密沈下量が、ほぼゼロになるまで繰返す。

Fig. 4 は、このような実験過程を、 $e \sim \log \sigma'_v$  曲線上に概念的に示したものである。図中、NCL は正規圧密曲線を示し、 $I_0$  点が 24 時間の圧密終了時、すなわち繰返しせん断を行う前の状態を示している。

非排水状態で、 $n_c$  回の繰返しせん断ひずみを与えると、間隙水圧の上昇に伴って、 $I_0$  点より  $D_1$  点に至る。その後排水を行うと、間隙水圧の消散と、圧密による間隙比の減少が生じ、図中の  $I_1$  点に至る。そして同様な操作によって、非排水繰返しせん断 ( $I_{i-1} \sim D_i$ )、排水 ( $D_i \sim I_i$ ) を繰り返す。そして最終的には、 $I_i$  と  $I_{i+1}$  における間隙比の変化がほぼゼロとなったとき ( $I_n$  の状態) 実験を終了した。なお、今回の実験では、各非排水過程での繰返し回数の総和  $n (= \sum n_c) = 200$  回で、 $I_n$  の状態に到達した。

また、Fig. 4 において、点 F は  $n_c=200$  回とした場合に、第 1 回目の非排水過程で到達する状態を示しており、このとき間隙水圧は、繰返し回数の増加に対してほぼ一定になることから、この場合は F に到達後排水を行い、間隙水圧が消散した時点で実験を終了した。

以上に述べたような、一連の操作において、今回は、ひずみ振幅  $\gamma_a$  は、 $\gamma_a=0.33\%$ 、 $0.55\%$ 、 $0.90\%$ 、 $1.50\%$  とし、また  $n_c$  は、それぞれのひずみ振幅に対して、5 回、10 回、20 回および 200 回とした。

ここでは、4 種類のひずみ振幅を用いたが、それは、①せん断ひずみ振幅が  $10^{-3} \sim 10^{-2}$  のオーダーになると、ダイレイタンスー現象や間隙水圧の発生に伴ったひずみ軟化現象が現われる。②すでに、繰返しせん断ひずみによる繰返し効果 (繰返し回数の増大によるせん断強度の

減少をいう) は、ひずみ振幅が約  $1.0\%$  のとき最も大きく現われることが確かめられている<sup>6)</sup>こと、等から  $1.0\%$  付近のひずみ振幅を用いたものである。

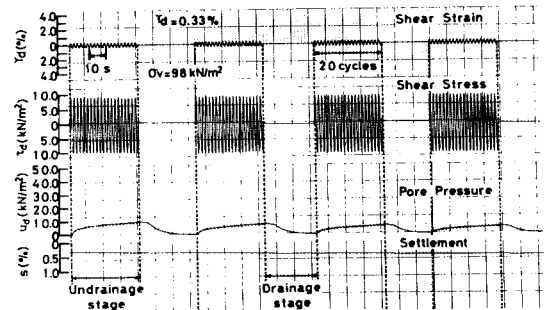
また、 $n_c=5, 10, 20$  回とした試験では、繰返しせん断に伴うダイレイタンスー特性を調べることを目的として行い、 $n_c=200$  回の場合は、間隙水圧発生特性を調べることを目的として行った。

### 3. 実験結果および考察

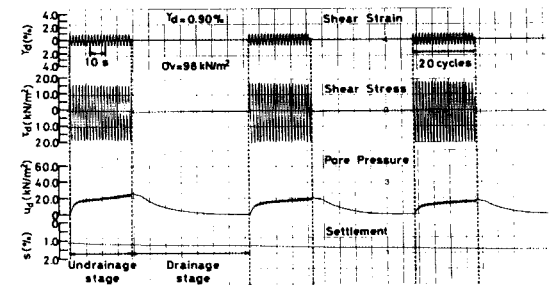
#### (1) 繰返しせん断によって生じる体積ひずみ

Fig. 5 (a), (b), (c) は、排水を伴った繰返しせん断試験によって得られた代表的な記録波形である。

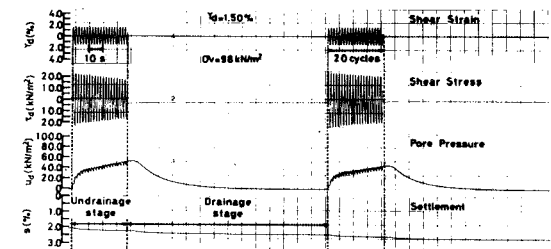
これらの図は、圧密圧力を  $98 \text{ kN/m}^2$  とし、各非排水せん断時の、繰返し回数が ( $n_c=$ ) 20 回、繰返しせん断ひずみ振幅が、それぞれ ( $\gamma_a=$ )  $0.33\%$ 、 $0.90\%$ 、 $1.50\%$  の場合について、繰返し回数の総和が、 $80 \sim 140$



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Typical records of dynamic shear test with drainage.

回となる部分を示したものである。

図中の波形は、上からせん断ひずみ、せん断応力、間隙水圧、沈下ひずみ、をそれぞれ示している。

これらの図からもわかるように、ほぼ正弦波状のひずみ波形が得られている。また、せん断応力は、いずれの非排水せん断過程（排水を伴った繰返しせん断試験においては、非排水状態で繰返しせん断を行う過程を、非排水せん断過程、その後に行う圧密過程を、排水過程とよぶ）においても、間隙水圧は各非排水せん断過程の、はじめの2~3サイクルにおいて急激な上昇がみられるが、その後は緩やかになっている。そして、 $n_c$ 回の繰返しせん断によって生じる間隙水圧は、各非排水せん断過程ごとに小さくなっている。

また、排水過程においては、供試体上面より排水し、供試体下面での間隙水圧が消散するまで圧密を行うが、非排水時における間隙水圧の発生量の減少に伴って、消散に要する時間も短くなっている。一般に過圧密粘土の圧密速度は、正規圧密粘土の圧密速度より大きくなるが<sup>7)</sup>、ここでもそれに類似した現象が生じたものと考えられる。

すなわち、Fig. 4 でみても、繰返しせん断を受けて、沈下を生じた供試体は、見掛けの過圧密状態にあるといえる。

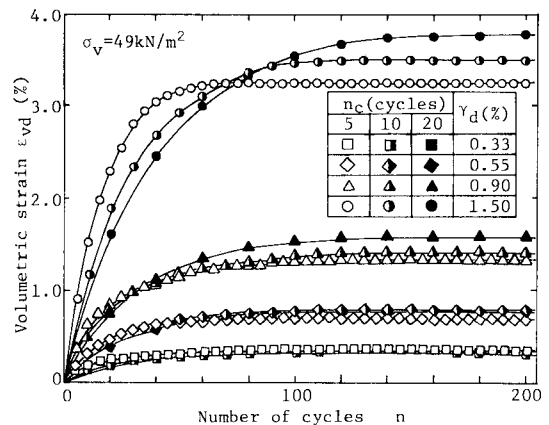
なお、Fig. 5 から明らかなように、Fig. 4 の  $I_t-D_{t+1}$  間すなわち、非排水せん断過程でも、わずかの沈下ひずみを生じているが、これは、メンブレンの内部圧力が外部圧力より大きくなったとき生じる、メンブレンのペダスタル固定部へのわずかの膨張によるものである<sup>8)</sup>。なお、本実験では、この影響を最小限に抑えるために、供試体にバックプレッシャーを与えするという操作を行っている。

これらの記録波形において、各排水過程、すなわち Fig. 4 の  $D_1-I_1$ 、 $D_2-I_2$ 、 $\dots$ 、 $D_i-I_i$ ……で生じた、供試体の体積ひずみ  $\epsilon_{vd}$  と、繰返し回数  $n$  の関係を示したものが、Fig. 6 (a)、(b) である。ここで、 $n$  は、各非排水せん断過程での繰返し回数  $n_c$  を累積したものである。

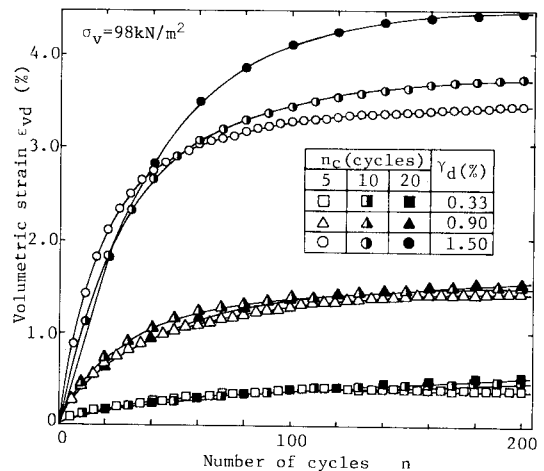
これらの図より、各せん断ひずみ振幅ごとに、体積ひずみ  $\epsilon_{vd}$  は、一定値に収束しており、正規圧密された飽和粘土に、排水を伴った繰返しせん断試験を行った場合、累積される体積ひずみには、限界値が存在すると考えられる。

ただし、 $\gamma_a=1.50\%$  では、繰返し回数の総和が40~60回までの体積ひずみは、一般に、 $n_c=5$ 回の方が、 $n_c=20$ 回の値より大きくなっているが、最終的には  $n_c$  が大きい方の体積ひずみが、上に位置している。

この原因は、間隙水圧の上昇が、各非排水せん断過程における繰返しせん断の、はじめの数パルスにおいてそ



(a)



(b)

Fig. 6 Relationships between  $\epsilon_{vd}$  and  $n$ .

の大部分が生じるので、供試体に加えられた繰返し回数の総和  $n$  が同じであっても、供試体に与えられる圧密非排水せん断過程の回数、 $n_c=5$ 回の供試体では、 $n_c=20$ 回の供試体の4倍ということになるので、 $n_c=5$ 回の供試体の方がその影響を強く受けていると考えられる。

また、Fig. 6 (a)、(b) より、各せん断ひずみ振幅に対して、累積体積ひずみは、ほぼ一定値に収束することから、 $n=200$ 回における累積体積ひずみ  $\epsilon_{vd}$  と、せん断ひずみ振幅  $\gamma_a$  の関係を示したものが Fig. 7 である。

この図には、圧密圧力の異なる結果を一緒に示しているが、ひずみ振幅が大きいほど、累積体積ひずみは大きく、その値は圧密圧力によってあまり影響はされないことがわかる。このことは、繰返しせん断によって生じる体積ひずみは、圧密圧力よりも、ひずみ振幅に依存するといえる。

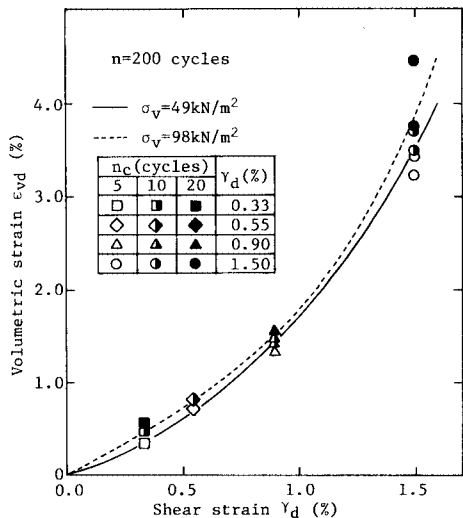
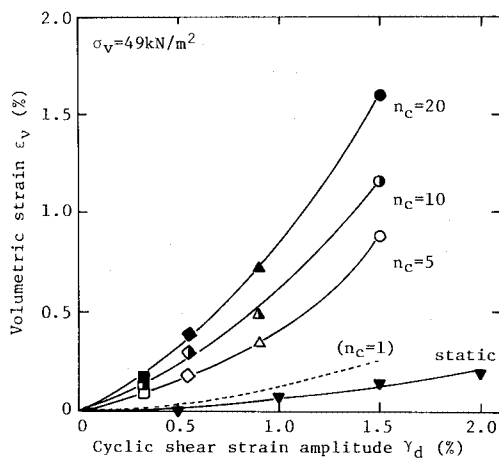
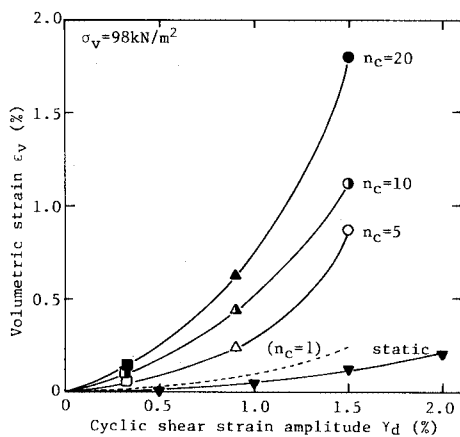


Fig. 7 Relationships between  $\epsilon_{vd}$  and  $\gamma_d$ .



(a)



(b)

Fig. 8 Relationships between  $\epsilon_v$  and  $\gamma_d$ .

一方, Fig. 8 (a), (b) は繰返しせん断と, 静的せん断の場合に生じる, 供試体の体積ひずみと, せん断ひずみまたはせん断ひずみ振幅の関係を, 各圧密圧力に対して示したものである。

ここで, 静的試験は次の方法で行った。まず, 0.5% のせん断ひずみを非排水状態で与えた後, 供試体上面より排水し, 下面での間隙水圧をゼロにする。再び非排水状態にして, せん断ひずみを 1.0% まで増加した後, 排水によって間隙水圧をゼロにする。このような操作を, せん断ひずみが 2.0% になるまで行った。なお, せん断ひずみの速度は, 1%/min とした。

繰返しせん断の結果は, Fig. 4 に示す  $D_1-I_1$  の排水過程で生じた体積ひずみ  $\epsilon_{va}$  とひずみ振幅  $\gamma_d$  の関係を, それぞれ  $n_c$  について示している。 $D_1-I_1$  のみを考えてのは, この場合が, 正規圧密状態  $I_0$  で繰返しせん断を受けて発生した間隙水圧の排水過程に相当するからである。

また, 図中の点線は, 体積ひずみが, 各ひずみ振幅に対して  $n_c=5\sim 20$  回の場合で得られているので, これより  $n_c=1$  回の場合の体積ひずみを推定したものである。

この推定値は, 静的せん断の場合の約 2 倍である。これより, 繰返しせん断で得られる間隙水圧発生量が, 静的せん断の場合に比べて大きいのは, 繰返しせん断によって生じる体積ひずみの方が, 大きいことによると考え得る。

すなわち, 排水を伴った繰返しせん断試験で得られる, 排水過程の沈下量の累積から求めた体積ひずみによって, 繰返しせん断による間隙水圧の発生量を説明できる, との考えが成り立つ。それを裏付けることができるかどうかを検討することが, 今回の研究の主目的の一つである。

(2) 間隙水圧の発生について

ここでは, 非排水せん断過程で生じる間隙水圧について述べる。

Fig. 9 (a), (b) は, Fig. 4 において,  $I_0-F$  の非排水せん断過程で生じた, 間隙水圧と繰返し回数の関係を示したものである。図中のプロットは, 実測値を示す。それらの測定値は  $n/(u/\sigma_v)$  と  $n$  の関係で整理すると, 両者の間には, 直線関係が得られることから, 次式の関係が成り立つ。

$$u/\sigma_v = n/(a + \beta n) \dots \dots \dots (1)$$

Fig. 9 の曲線は, 式 (1) で得られる計算値を示したもので, 実測値とよく一致している。このことから, ひずみ振幅を一定にした場合, 間隙水圧発生量は, 式 (1) によって近似できることがわかる。

すでに, 乾燥砂に一定振幅のせん断応力を与えたとき,

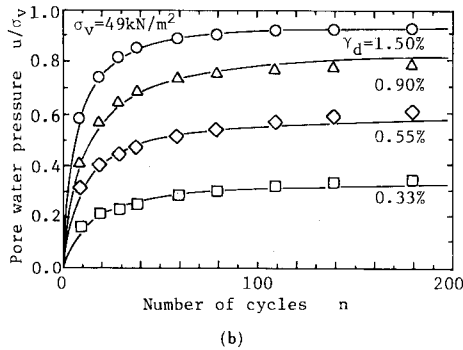
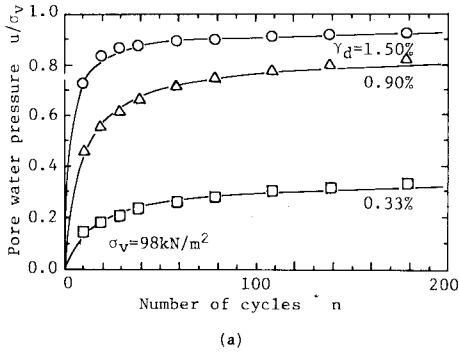


Fig. 9 Relationships between  $u/\sigma_v$  and  $n$ .

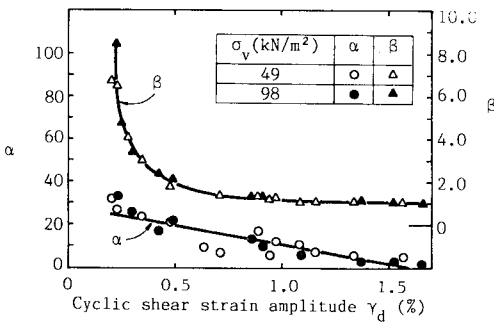


Fig. 10 Parameters  $\alpha$  and  $\beta$

せん断応力の繰返し回数と、累積体積ひずみの間に、双曲線関係のあることが示されている<sup>9)</sup>。今回の実験で得られた結果は、このことと等価であって、体積ひずみと間隙水圧の発生が、本質的には、いずれも土のダイレイタンスーに關係していることを示すものである。なお、式(1)中、 $\alpha$ 、 $\beta$ はいずれもひずみ振幅の関数であり、Fig. 10からも明らかなように、 $\alpha$ はひずみ振幅が増加すると直線的に減少するのに対し、 $\beta$ はひずみ振幅との關係が双曲線關係で表わされることから、それぞれ次のように表わされる。

$$\alpha = A_1 - A_2 \gamma_d \dots\dots\dots (2)$$

$$\beta = \gamma_d / (-B_1 + B_2 \gamma_d) \dots\dots\dots (3)$$

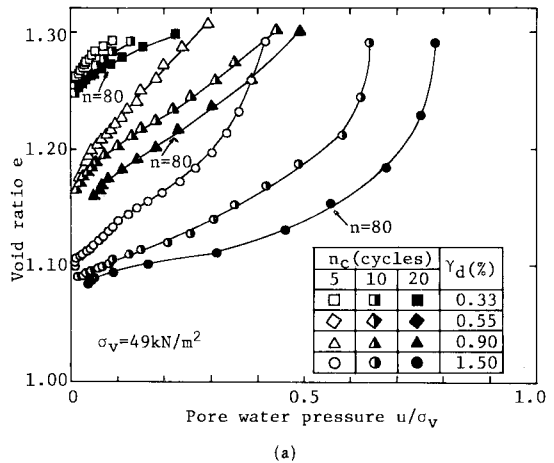
ここに、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ は定数であり、本実験からは、 $A_1=29.30$ 、 $A_2=14.41$ 、 $B_1=0.22$ 、 $B_2=1.10$ が得られた。これらの値を、式(2)、(3)に代入すると、式(1)は次のように書き換えられる。

$$u/\sigma_v = n / [(29.30 - 14.41 \gamma_d) + \{\gamma_d / (-0.22 + 1.10 \gamma_d)\} n] \dots\dots\dots (4)$$

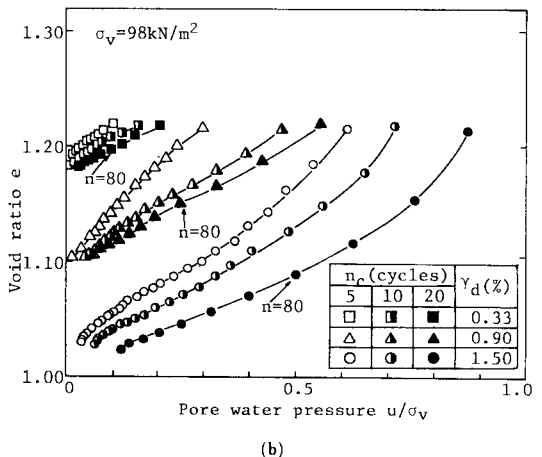
なお、 $\alpha$ 、 $\beta$ は圧密圧力が49 kN/m<sup>2</sup>、98 kN/m<sup>2</sup>の場合に、ほぼ同じ値をとることから、式(4)は今回行った実験の範囲では、圧密圧力に關係なく成立し、繰返しせん断ひずみ振幅に關係することが明らかとなった。

Fig. 11は、Fig. 4において $I_0-F$ 、または、 $I_{t-1}-D_t$ 間で発生する間隙水圧と、各非排水過程の初期の間隙比 $e_0$ との關係を、それぞれの圧密圧力の場合について示したものである。せん断ひずみ振幅、および圧密圧力が大きいほど、間隙水圧の発生量は大きくなっている。

さらに、間隙水圧の発生量は、間隙比の減少に伴って減少している。また間隙比の変化量はどの曲線においても、最終的にはほぼゼロとなり、同一のせん断ひずみ振



(a)



(b)

Fig. 11 Relationships between  $e$  and  $u/\sigma_v$ .

幅では、 $n_c$ に無関係に、間隙比がほぼ同一の値に落ち着くことがわかる。このことは、前述したように、Fig. 6で $\epsilon_{vd}$ は繰返し回数が増加すると一定値に収束することに対応する。

また、このような傾向は、France et al.<sup>10)</sup>が三軸圧縮試験装置を用いて得た結果と一致している。

一方、排水を伴った繰返しせん断試験では、 $n_c$ 回の繰返しせん断後、排水を行った状態は、それぞれFig. 4における $I_1, I_2 \dots I_n$ 点に相当するが、それらの点は、明らかに正規圧密曲線上にはない。

このような状態は、過圧密状態に近いものと考えられるが、この状態におけるすべての特性が過圧密粘土と同一であることが確かめられていないので、ここではこの状態を擬過圧密状態とよぶことにする。

すでに、三軸試験において、二次圧密を受けた粘土供試体に対して、せん断試験を行うと、間隙水圧発生量は、正規圧密粘土のそれより小さいこと<sup>11)</sup>、また、過圧密粘土に対して、動的単純せん断試験を行うと、やはり間隙水圧発生量は正規圧密粘土のそれより小さいことが知られている<sup>9)</sup>。

したがって、排水を伴った繰返しせん断を受けた供試体が、擬過圧密状態にあると考えれば、Fig. 11に示す実験結果も理解できる。ただし、この状態と過圧密あるいは二次圧密を受けた状態（この状態の粘土を、擬過圧密粘土とよぶこともある<sup>12)</sup>）とは、時間効果の有無、あるいは応力径路の相違、等の影響によって異なるとも考えられるので、今後さらに研究が必要であろう。

(3) 体積ひずみと間隙水圧の対応

いま、体積圧縮係数が $m_s$ の粘土骨格に、 $\Delta\sigma'$ の有効応力の増加があったとすれば、粘土の体積減少量は、 $m_s\Delta\sigma'$ となり、粘土の場合、間隙水の体積膨張係数は、 $m_w \ll m_s$ 、なる事実などを考慮すると、粘土の体積変化量 $\Delta\epsilon_v$ は、次式で近似される。

$$\Delta\epsilon_v = m_s \Delta\sigma' \dots \dots \dots (5)$$

同様の方法によって、粘土骨格の体積膨張係数を $m'_s$ とし、 $m_s = m'_s$ とすると、 $\Delta\epsilon_v$ と $\Delta\sigma'$ の関係は、次式のようになる。

$$\Delta\epsilon_v = m'_s \Delta\sigma' \dots \dots \dots (6)$$

このうち、式(6)は、すでに八木によって提案されているが<sup>13)</sup>、ここでは、これらの式を用いて、非排水繰返しせん断によって得られた間隙水圧値から、排水繰返しせん断試験を行った場合に生じるであろう体積ひずみの値を求め、Fig. 6と比較・検討した。

$m_s, m'_s$ を求めるために、標準圧密試験装置、および単純せん断装置を用いて、除荷・再載荷試験を行った。その結果を、有効応力と体積膨張・圧縮ひずみの関係として示したのが、Fig. 12 (a), (b)である。

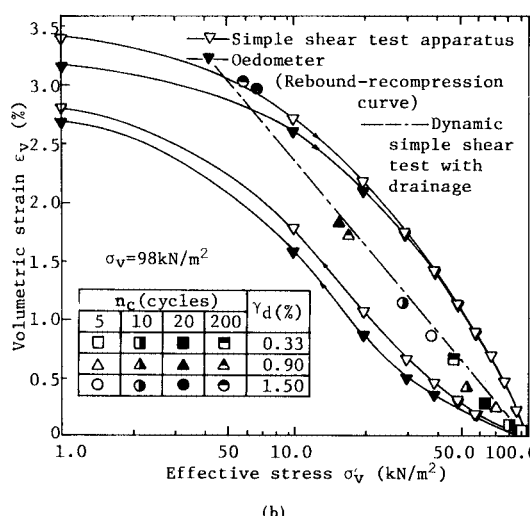
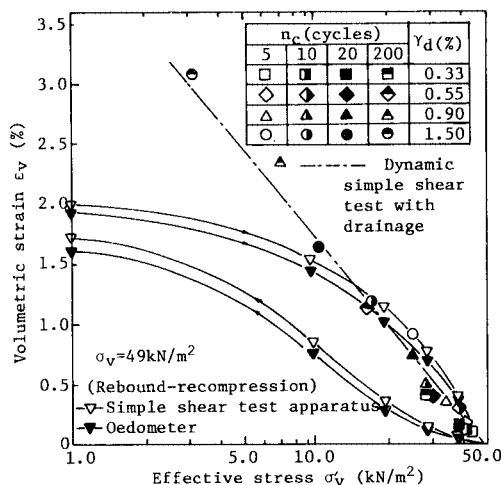


Fig. 12 Relationships between  $\epsilon_v$  and  $\sigma'_v$ .

図より、標準圧密試験装置、および単純せん断試験装置を用いて得られた結果については、後者が、供試体の側面をメンブレンで覆っているという点で、前者と異なっているが、両者の結果は、比較的よく一致している。

なお、図中の $\sigma_v = 1 \sim 10 \text{ kN/m}^2$ のような低い有効応力レベルでの実験精度に関しては、Fig. 9 (a), (b)からも明らかのように、間隙水圧の発生量が最大で圧密圧力の約9割であることから、有効応力は $5 \text{ kN/m}^2$ 以下になることはない。したがって、この範囲の実験を通常の方法で行ったとしても、実験上の精度が以後の考察に及ぼす影響は小さいと考えられる。

また、図中の一点破線で示す直線は、Fig. 4に示した $D_i - I_i$ に相当する排水過程で生じた体積ひずみと、 $I_{i-1} - D_i$ 間の有効応力の変化、との関係を示したものである。

すなわち、排水を伴った繰返しせん断試験において、繰返しせん断中に生じた間隙水圧と、それに続く排水過程での体積ひずみとの関係をプロットしたものである。

この直線を式で表わせば、次のとおりである。

$$\epsilon_v = K - C'_c \log \sigma'_v \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $K$  は  $\sigma'_v = 1.0 \text{ kN/m}^2$  のときの  $\epsilon_v$  の値である。また、 $C'_c$  は圧縮指数  $C_c$  と次の関係がある。

$$C'_c = C_c / (1 + e_0)$$

ここに、 $e_0$  は初期間隙比であり、この値は、すでに述べたように、1.30 ( $\sigma_v = 49 \text{ kN/m}^2$ )、1.22 (98 kN/m<sup>2</sup>) である。

Fig. 9 は、Fig. 4 において、 $I_0 - F$  間で発生した間隙水圧と、繰返し回数の関係を示したものである。そして、ある繰返し回数ときの有効応力を、 $\sigma_v - u$  として、Fig. 9 から求め、その値を、Fig. 12 の横軸上にとる。そして、Fig. 12 の曲線、あるいは直線のいずれかに着目して、横軸上にとった有効応力値に対応する体積ひずみを求め、 $\epsilon_{vu}$  とする。Fig. 13 が、このようにして求められた、 $\epsilon_{vu}$  と  $n$  の関係の一例である。これは圧密圧力  $\sigma_v = 49 \text{ kN/m}^2$  で、標準圧密試験装置を用いた試験のうち、除荷曲線 (Fig. 12 (a)) を用いて得られた結果である。同様な結果は、Fig. 12 の他の曲線を用いた場合にも得られる。

すでに述べたように、Fig. 4 の非排水せん断過程  $I_{1-1} - D_i$  で体積が一定に保たれるのは、排水条件のもとで生じる体積減少  $I_{1-1} - I_i$  と、有効応力の減少に伴って生じる体積膨張  $I_i - D_i$  が同時に生じる結果である、と考えることができる。このような解釈は、非排水条件下で、飽和砂に繰返しせん断を与えたときに生じる、間隙水圧蓄積メカニズムに対しても行われている<sup>(4)</sup>。

ここでは、以上の考えが、実験によって立証し得るかどうかということと、立証し得るとしても、 $m_s$ 、 $m'_s$  のどちらを用いよいか、などを検討する。そのためには、排水を伴った繰返しせん断試験によって求められた  $\epsilon_{vd}$  と、先に求めた  $\epsilon_{vu}$  を比較すればよいことになる。

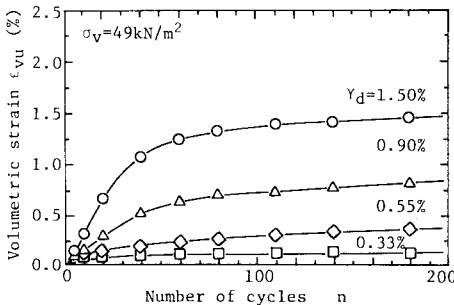
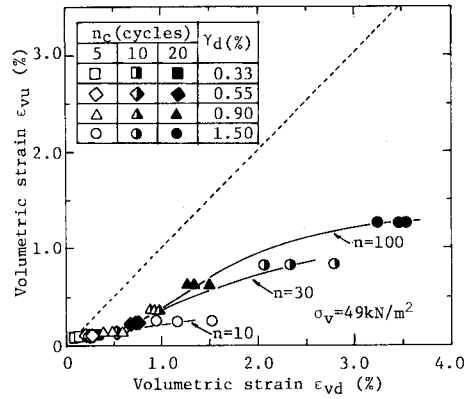
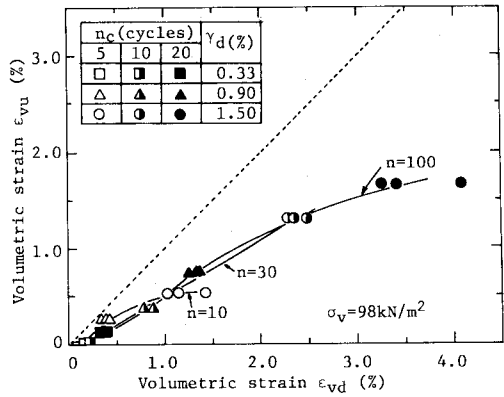


Fig. 13 Relationships between  $\epsilon_{vu}$  and  $n$ .



(a)



(b)

Fig. 14 Relationships between  $\epsilon_{vu}$  and  $\epsilon_{vd}$ .

一般的には、このような場合、有効応力の減少に伴う体積膨張が問題となることから、除荷曲線 ( $m'_s$ ) が用いられる。

Fig. 14 は、Fig. 12 の標準圧密試験装置による除荷曲線を用いて求めた  $\epsilon_{vu}$  と  $\epsilon_{vd}$  とを比較したものである。一方、Fig. 15 は、比較のために、再载荷曲線を用いて求めた、同様な結果を示したものである。いずれも、繰返し回数の総和が、10、30、100 回における値で比較している。

これらの図より、除荷曲線を用いた場合 (Fig. 14) には、ひずみ振幅および繰返し回数の総和にかかわらず、 $\epsilon_{vu}$  は  $\epsilon_{vd}$  より大きくなり、 $\epsilon_{vu} \approx 1/2 \epsilon_{vd}$  となっている。一方、再载荷曲線を用いた場合 (Fig. 15)、ひずみ振幅が 1.5 % では  $\epsilon_{vd}$  の方が大きくなる場合があるものの、一般的に  $\epsilon_{vu}$  が多少大きくなる傾向がある。

このことは、繰返しせん断による間隙水圧の蓄積量を解析的に求める場合、排水を伴った繰返しせん断試験によって、体積ひずみ  $\epsilon_{vd}$  を、また一次元除荷試験によって、体積膨張係数  $m'_s$  を求め、 $u \approx \epsilon_{vd} / m'_s$  の式を用いる



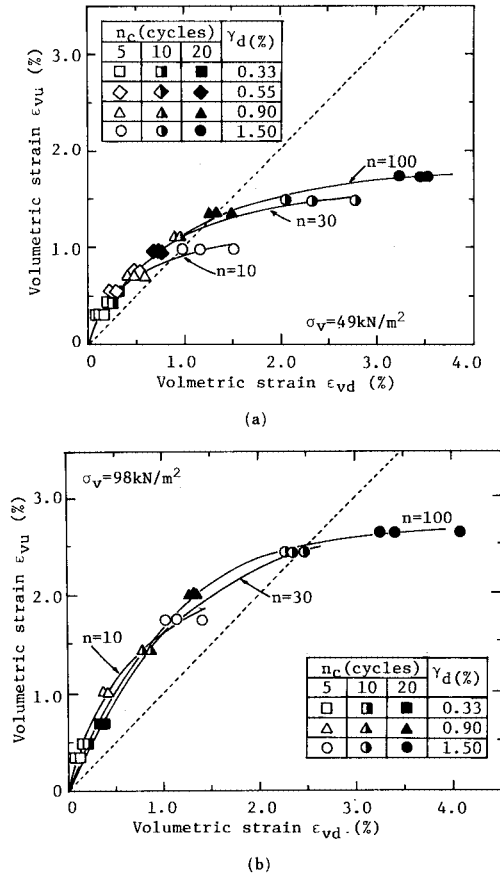


Fig. 15 Relationships between  $\epsilon_{vu}$  and  $\epsilon_{vd}$ .

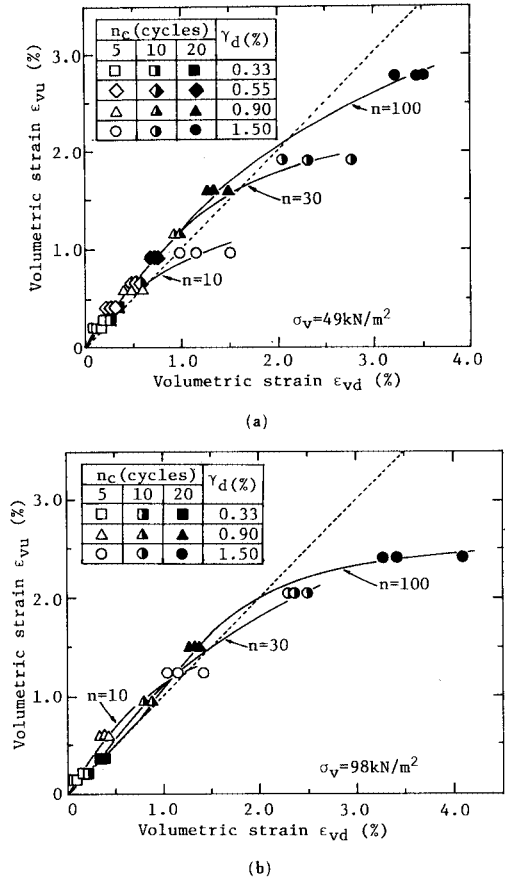


Fig. 16 Relationships between  $\epsilon_{vu}$  and  $\epsilon_{vd}$ .

方法に修正が必要であることを意味する。

本実験により、実用的には除荷試験を行う方が、粘性土のダイレイタンスーを考える際に、有効であると考えられる。しかし、いずれにしても、排水を伴った繰返しせん断試験において、繰返しせん断中に生じた間隙水圧と、それに続く排水過程での体積ひずみの曲線より得られた直線から、体積ひずみ  $\epsilon_{vu}$  を算出したものが、 $\epsilon_{vd}$  と一番よく一致することが、Fig. 16 によって示されている。

#### 4. 結 語

本論文は、飽和粘土に繰返しせん断が作用したときの、間隙水圧の発生量予測を、粘性土のダイレイタンスー特性を明らかにすることによって、確立することを目的として行ったものである。すなわち、非排水繰返しせん断中に発生する間隙水圧は、繰返しせん断によって生じるべき体積変化が妨げられた結果として発生する、という考えに立っている。そこで、飽和粘土に非排水状態で、所定の繰返しせん断ひずみを与えた後、いったん排水し、

間隙水圧が消散した時点で再び非排水状態にし、さらに繰返しせん断ひずみを与える実験（この試験を「排水を伴った繰返しせん断試験」という）を行った。

その結果、次のような結論を得た。

- (1) 排水を伴った繰返しせん断試験で、体積ひずみを生じた状態 (Fig. 4 で  $I_1 \dots I_n$ ) は正規圧密曲線上ではなく、擬似過圧密状態にある。
- (2) 0.1~2.0% の繰返しせん断ひずみに対しては、非排水過程での繰返し回数  $n_c$  に無関係に、最終的な累積体積ひずみは、ほぼ一定値に収束することから、累積体積ひずみには限界値のようなものが存在する。また、その大きさは、圧密圧力にはあまり影響を受けず、繰返しせん断ひずみ振幅に依存する。
- (3) 飽和粘土の繰返しせん断試験で発生する間隙水圧量が、静的せん断試験のそれに比べて大きいのは、繰返しせん断ひずみ履歴の蓄積によるものである。
- (4) 間隙水圧の発生量と、繰返し回数の間には双曲線関係が見出され、間隙水圧発生量が、せん断ひずみ振幅と繰返し回数をパラメーターとして、式 (1), (2),

(3) の形で表わされ、 $u/\sigma_v$  は圧密圧力には無関係であることが明らかになった。

(5) 非排水繰返しせん断中に発生した間隙水圧を、別に行った除荷・再載荷試験から得た  $m_s$ ,  $m'_s$  を用いて体積ひずみ  $\epsilon_{vu}$  に換算し、それを排水を伴った繰返しせん断試験から求められた体積ひずみ  $\epsilon_{vd}$  と比較した。その結果  $\epsilon_{vu}$  は  $\epsilon_{vd}$  の約 1/2 であることがわかり、繰返しせん断によって発生する、間隙水圧の予測には、 $m_s$ ,  $m'_s$  を修正して用いる必要があることが明らかになった。

#### 参 考 文 献

- 1) Seed, H. B. and Chan, C. K.: Clay strength under earthquake loading conditions, ASCE, Vol. 92, SM 2, pp. 53~78, 1966.
- 2) Sangrey, D. A., Henkel, D. J. and Esring, M. I.: The effective stress response of saturated clay soil to repeated loading, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 6, No. 3, pp. 241~252, 1969.
- 3) 松井 保・小原秀夫・伊藤富雄: 飽和粘土の力学特性に及ぼす動的応力履歴の影響, 土木学会論文報告集, 第 257 号, pp. 41~51, 1977.
- 4) 大原資生・松田 博: 飽和粘土の動的強度について, 土木学会論文報告集, 第 247 号, pp. 69~78, 1978.
- 5) 大原資生・山本哲朗・滝本邦彦: 繰返しせん断応力を受ける飽和粘土の間隙水圧について, 土木学会論文報告集, 第 297 号, pp. 127~130, 1980.
- 6) 4) に同じ, または, 大原資生・山本哲朗・生田裕彦: 繰返しせん断履歴をうけた飽和粘土のせん断強度について, 土木学会論文報告集, 第 315 号, pp. 75~82, 1982.
- 7) 中瀬明男: 過圧密粘土の圧密特性, 第 6 回土質工学研究発表会概要集, pp. 117~120, 1971.
- 8) 古賀泰之: 繰返しせん断試験, 土と基礎, Vol. 29, No. 11, pp. 64~66, 1981.
- 9) Oh-oka, H.: Drained and undrained stress-strain behavior of sands subjected to cyclic shear stress under nearly plane strain condition, Soils and Foundations, Vol. 16, No. 3, pp. 19~31, 1976.
- 10) France, J. W. and Sangrey, D. A.: Effect of drainage in repeated loading of clays, ASCE, Vol. 103, No. GT 7, pp. 769~785, 1977.
- 11) 山口晴幸・三田地利之・北郷 繁: 繰返し飽和粘性土の非排水応力-ひずみ-強度挙動に及ぼす二次圧密の影響, 土質工学論文報告集, Vol. 21, No. 3, pp. 123~131, 1981.
- 12) 吉国 洋: 土の圧縮と圧密, 土質工学ハンドブック, pp. 147~185, 1982.
- 13) 八木則男: 繰返しせん断による砂の体積変化と過剰間隙水圧, 土木学会論文報告集, 第 275 号, pp. 79~90, 1978.
- 14) 吉見吉昭: 砂地盤の液状化, 技報堂出版, pp. 16~17, 1980.

(1984. 4. 26・受付)