

# 繰返しせん断をうけた飽和粘土の間隙水圧の発生について

## Pore Water Pressure of Saturated Clay

### under Cyclic Shear

大 原 資 生<sup>\*</sup> ( Sukeo O-hara )  
松 田 博<sup>\*\*</sup> ( Hiroshi Matsuda )  
近 藤 泰 生<sup>\*\*\*</sup> ( Yasuo Kondo )

キーワードズ：間隙圧／繰返し荷重／動的／ダイレタンシー／粘土 ( I G O : D 7 )

## 1. 緒言

飽和粘性土の動的強度、いわゆる繰返しせん断をうけた粘土の強度低下の問題は軟弱地盤およびそこに設けられた構造物の耐震性を検討する上での重要な因子となる。しかるに、これには初期間隙比、過圧密比、粘着力、せん断ひずみ、繰返し回数など多くの影響因子が複雑にからみ合っているために明確な結論が出せないでいる。<sup>1),2),3)</sup>

この問題については、H. B. Seed らをはじめ、Sangrey ら、松井らによる研究があるがその多くは動的三軸試験によるものである。

また、これらの研究の荷重方式は、供試体に①一定のせん断応力振幅を与える方法、②ある値の静的せん断応力を与えた状態で繰返しせん断応力を負荷する方式などが用いられたものが多い。

最近の研究では、飽和粘土の動的強度や動的挙動の解明にも有効応力法の立場からのアプローチが必要であるという考えから間隙水圧の測定が行われたが、三軸試験機を用いているため、その供試体の大きさから繰返し荷重中の間隙水圧の時間的变化を十分な精度で測定できないとも考えられる。

著者らは地盤中の地震時応力条件の再現性が優れている点や、供試体の厚さが約2.0 cmで三軸供試体ほど大きくないので間隙水圧の変化が十分な精度で測定できるという点から動的三軸試験機を用いて、飽和粘土の供試体に一定振幅の繰返しせん断応力またはひずみを与える実験を行って、粘土の動的せん断強度および動的せん断履歴をもつ粘土のせん断強度の変化を調べる実験を行い、粘土のこれら強度は繰返しせん断中に生じる間隙水圧の影響を強くうけることを明らかにした。<sup>4)</sup>

これらの実験において、繰返しせん断をうけた供試体に発生する間隙水圧は静的せん断をうけたそれより2～4倍程度大きいことがわかっており、<sup>5)</sup>このことによって飽和粘土の動的強度が一般的に静的強度より小さく、また、繰返し回数の増大にともな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圧の20%から40%であるのに対し、繰返しせん断によるそれは初期有効圧の80%にもなる。この事実が砂の場合には液状化を生じるのであるが、飽和粘土でもこの事実について検討を加え、飽和粘土の動的強度について根本的な考察を行った結果をのべたものである。

## 2. 実験装置

今回の実験に用いた装置は、正弦波変位制御型の動的単純せん断試験機で、一定振幅の正弦波変位の発生にはテコと偏心ローラーを組合せたせん断ひずみ負荷装置を用いた。

動的単純せん断試験機は従来からわれわれの実験室で用いているものである。せん断箱は Kjellmann 型で、繰返しせん断、静的せん断ともテコ応用の負荷装置をひずみ制御(変位制御)方式で用いた。図-1はせん断箱の部分の詳細を示す。

\* 山口大学工学部 教授, \*\* 同 講師, \*\*\* 同土木工学専攻 大学院生

せん断箱の詳細な説明は前論文<sup>4)</sup>にあるので、ここでは簡単にのべる。

水平移動台<sup>⑩</sup>の上にゴムスリーブに包まれた直径75mm、厚さ約2.0mmの供試体が置かれ、それは内径75.2mm、外径96.0mm、厚さ2.0mmのプラスチックリングが、15～16枚積み重ねられた中に取められている。

このため、鉛直圧が加わった状態でも供試体はせん断変形に対してはほぼ自由に挙動できるが、横方向の膨れ出しは拘束される。

供試体のせん断変形は、<sup>⑩</sup>の水平移動台に水平力または水平変位が加わることによって生じる。ゴムスリーブは上下のペDESTALにOリングで締め付けられた上から金属バンドがかけられ、間隙水が漏れないようにしてある。供試体中に発生する間隙水圧は、供試体下部からポラスストーンを介して銅管で電気抵抗線型の間隙水圧計(PGM-10KB)に導かれ測定された。

水平移動台と底板との間の摩擦抵抗を小さくするため、ローラーベアリング<sup>⑩</sup>が用いられている。しかし、摩擦抵抗を完全に消去することは構造上できない。そこで試料として水を用い、摩擦抵抗の検定を行って供試体に加わるせん断力を補正した。

図-2は繰返しせん断ひずみ負荷装置を示したものである。簡単に説明すれば、偏心ローラーを回転することによって、<sup>⑥</sup>を支点にレバー<sup>①</sup>の上段が水平に動き、ロッド<sup>④</sup>を通してせん断箱の水平移動台に変位が伝達される。せん断ひずみ振幅の大きさは偏心ローラーの取付位置を上下することによって変えられ、供試体には0.1～2.0%の範囲で繰返しせん断ひずみ振幅を与えることができる。すなわち供試体の高さが2.0cmと考えると、変位量は0.02～0.4mmとなる。せん断ひずみ波形は正弦波状であり、その周期は2.0秒とした。

トップキャップ<sup>④</sup>とトッププレート<sup>②</sup>はガタなしで結合されているので、供試体のせん断ひずみは水平移動台の変位を供試体の厚さで除して得られる。そこで、本実験では水平移動台の変位を差動変圧機型の変位計を用いて測定した。また、供試体に加わるせん断力は図-1に示すロードセル<sup>①</sup>で測定した。

供試体に鉛直圧を加えるには、トップキャップの軸棒の上にヨークをかけ、その皿の上に所定の重さの分銅をのせた。供試体の沈下量はその軸棒の頭部の球座にとりつけたダイヤルゲージ(電気抵抗線型)で測定した。

これらの測定量は動ひずみ計(DPM-110A)を通してペンオシログラフに記録し、解析された。

### 3. 試料および供試体

本実験に用いた試料は粉末状のカオリン粘土で、その物理諸定数は表-1に、粒度曲線は図-3に示す。

この試料に含水比が80%になるように脱気水を加え、よく練った後、水分の蒸発を防ぎながら一昼夜放置する。その後、さらに試料を攪拌してスラリー状になったものを真空容器に入れ、軽く振動を与えつつ約30分間放置するようにして脱気した。

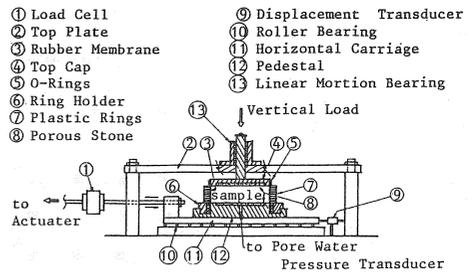


図-1 単純せん断試験機

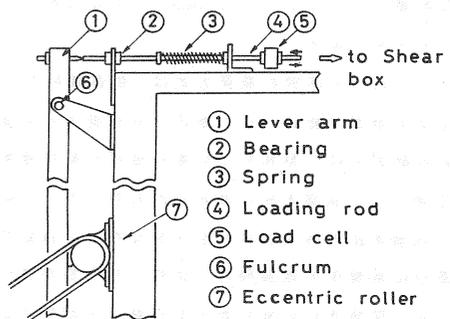


図-2 繰返しせん断ひずみ負荷装置

表-1 試料の物理定数

Specific gravity	G <sub>s</sub>	2.718
Liquid limit	w <sub>L</sub> (%)	53.5
Plastic limit	w <sub>p</sub> (%)	28.5
Plasticity index	I <sub>p</sub>	25.0
Average grain size	D <sub>50</sub>	3.8 μm

このようにして作られたスラリー状の試料をせん断箱のゴムスリーブの中に3層に分けて、1層ごとに突き棒で軽く押えて詰めた。供試体がセットできたら供試体を上下両面から排水可能な状態にして、所定の圧密圧力で約24時間圧密する。圧密後の供試体の寸法は7.5 cm、高さ約2.0 cmの円板状である。

なお、本実験では、圧密圧力を49 kN/m<sup>2</sup>、98 kN/m<sup>2</sup>とした。圧密後の間隙比はそれぞれ1.295と1.216であった。

圧密後の供試体は飽和度を100%に近付けるために、圧密圧に等しいバックプレッシャーを数10秒間負荷し、間隙水圧が定常となったのを確認した後、バックプレッシャーをゼロに戻した。このようにして準備された供試体の飽和度は98%以上であった。

#### 4. 実験方法

動的せん断試験を行う前に、静的強度を求めるための静的試験を行った。静的試験は同じ単純せん断試験機の動ひずみ負荷装置の偏心ローラーをとりはずして、静的試験用のギャボックスをとりつけて、テコの下端を一方方向に一定速度で動かすようにした。静的せん断強度 ( $\tau_{sf}$ ) はせん断ひずみが15%となったときのせん断応力の値とした。すなわち、15%のせん断ひずみが生じたとき供試体は破壊したと考えた。

動的試験はひずみ振幅 ( $\gamma_d$ ) を0.33%、0.55%、0.90%、1.50%として、次の2種類の試験を行った。

(1) 排水をともなった繰返しせん断試験：この試験は繰返しせん断の負荷によって生じるダイレタンシー特性を求めるために行った。その方法は、まず供試体を非排水状態にし、所定の回数 ( $n_c$ ) だけの繰返しせん断ひずみを加えた後、一旦排水状態にして、その間に生じた間隙水圧をゼロにし、再び非排水状態にして繰返しせん断を加えた。この操作が、繰返しせん断後の排水によって生じる圧密沈下量がほぼゼロとなるまで繰返された。所定の繰返し回数  $n_c$  は5、10、20回である。

(2) 非排水繰返しせん断試験：この試験は繰返しせん断の負荷によって生じる間隙水圧を求めるために行った。非排水状態でひずみ振幅  $\gamma_d$  を(1)の試験と同一にして、繰返し回数200回与えた。

繰返し回数を200回としたのは、間隙水圧の上昇がほぼ一定値に落ち着く回数が200回であることによる。

これらの試験の過程を  $e - \log \sigma'_v$  ダイアグラム上に示したのが図-4である。図中のNOLは正規圧密曲線を示し、 $I_0$ 点が24時間の圧密終了後、すなわち繰返しせん断を行う前の状態を示している。

(1)の試験が非排水状態で  $n_c$  回の繰返しせん断ひずみを与えたときの状態経路が  $I_0 - D_1$ 、 $I_1 - D_2$ 、…… $I_{i-1} - D_i$  で示されており、 $D_1 - I_1$ 、 $D_2 - I_2$ 、…… $D_i - I_i$  が間隙水圧の消散過程を示している。この図で、 $I_n$  は繰返しせん断後の排水過程において沈下量がほぼゼロとなる状態である。今回の実験では、繰返し回数の総和が200回で  $I_n$  の状態に到達することから、そのとき実験を終了した。また、(2)の試験は  $I_0 - F$  の状態で示されている。

#### 5. 実験装置および考察

静的試験の結果では、全応力表示による値  $\phi = 13.8^\circ$

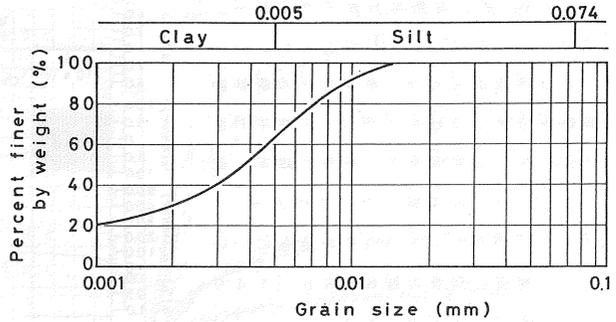


図-3 試料の粒度曲線

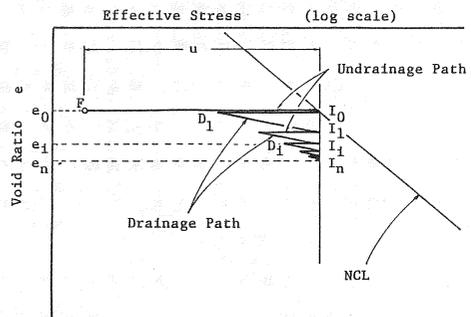


図-4 間隙比-有効応力

$c = 1.67 \text{ KN/m}^2$ , 有効応力表示では  $\phi' = 15.8^\circ$ ,  $c = 1.67 \text{ KN/m}^2$  であった。

図-5は排水をともなう繰返しせん断試験の記録例を示す。これらの図は、圧密圧力を  $98 \text{ KN/m}^2$  とし、非排水せん断時の繰返し回数  $N_c = 20$ , ひずみ振幅がそれぞれ  $\gamma_d = 0.33\%$ ,  $0.90\%$ ,  $1.50\%$  の場合について、とくに繰返し回数の総和が  $80 \sim 140$  となる部分を示したものである。

図中の波形は、上からせん断変位(ひずみ), せん断応力, 間隙水圧, 沈下量を示している。

各非排水過程の初期のせん断応力は排水過程を重ねるごとに大きくなっており、圧密によってせん断抵抗が増加していることがわかる。一方、間隙水圧は各非排水過程の初め2~3サイクルにおいて急激な上昇が見られ、20回の繰返しせん断によって生じる間隙水圧は各非排水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ゼロにな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ともなって、ゼロになるまでの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それより大きくなるが、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。

すなわち図-4でみても、繰返しせん断をうけて沈下を生じた供試体は過圧密状態にあることになる。

図-6は、図-4の  $D_1 - I_1 \dots D_2 - I_2$  で示される排水過程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である。ここで、 $n$  は各非排水過程での繰返し回数  $N_c$  を累積したものである。

この図より、各せん断ひずみ振幅ごとに体積ひずみ  $\epsilon_{vd}$  はほぼ同一値に収束しており、正規圧密された飽和粘土に排水をともなう繰返しせん断を行った場合、累積される体積ひずみには限界値が存在すると思われる。

ただし、 $\gamma_d = 1.50\%$  の結果では、繰返し回数の総和が  $40 \sim 60$  回までの累積体積ひずみは、一般的に  $N_c = 5$  の方が  $N_c = 20$  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大きくなっている。この原因は間隙水圧の上昇が、各非排水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急であるので、繰返し回数の総和  $n$  が同じであっても、 $N_c = 5$  では初期状態が  $N_c = 20$  の4倍あるということになるので、その影響を強くうけていると考えられる。

また、図-5より、各繰返しせん断ひずみに対して、累積体積ひずみはほぼ同一値に収束することから  $n = 200$  における累積体積ひずみ  $\epsilon_{vd}$  とせん断ひずみ  $\gamma_d$  の関係を表したのが、図-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は無関係であることがわかる。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

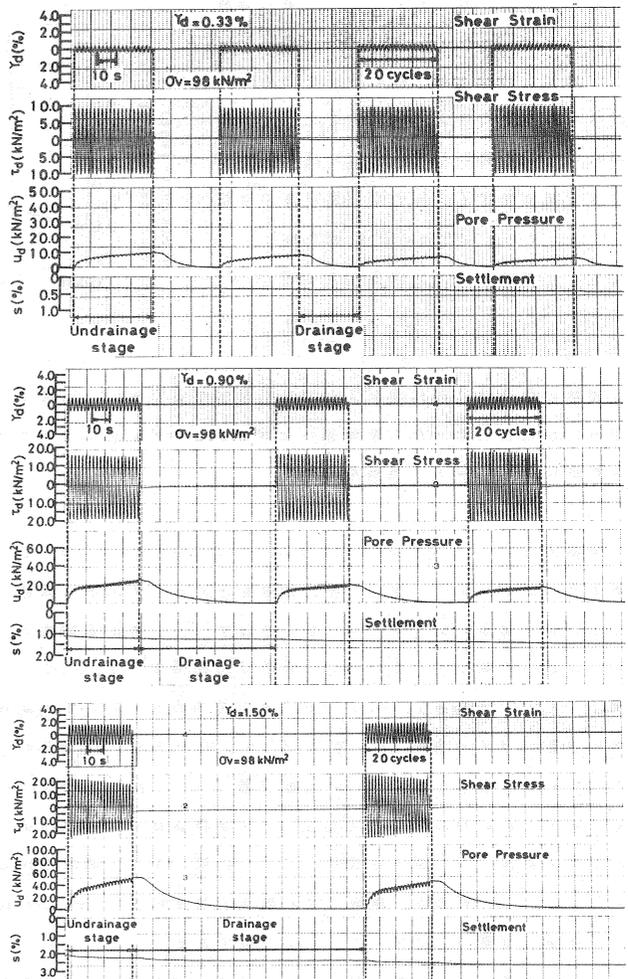


図-5 排水をともなう繰返し試験結果記録の例

よりひずみ振幅に依存するといえる。

図-8は、図-4において $I_{i-1}-D_1$ 間に発生する間隙水圧と各非排水過程の初期の間隙比 $e_i$ との関係を、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、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。

また、同じせん断ひずみ振幅および間隙比のもとでは $\rho_c$ 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、間隙水圧発生量は間隙比の減少にともなって減少しており、とくに、どの曲線においても、最終的には沈下量がほぼゼロとなり、同一のせん断ひずみ振幅では、 $\rho_c$ に無関係に、間隙比がほぼ同一値に落ち着くことがわかる。このことは、前述したように、図-6で $\varepsilon_{vd}$ は繰返し回数が増加するとほぼ同一値に収束することに対応する。

このような状態は、図-4における $I_n$ 点に相当するが、その点は $NOL$ 上にはなく、擬似過圧密の状態にある。

既に、三軸試験において、二次圧密をうけ擬似過圧密状態にある粘土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が知られている。

一方、過圧密粘土に対して繰返し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報告されている<sup>6)</sup>。

このように、排水をともなう繰返しせん断をうけた供試体が図-4に示すように、擬似過圧密状態にあると考えれば図-8に示す実験結果も理解できると思われる。

図-9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われた。まず0.5%のせん断ひずみを非排水状態で与えた後、排水して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、のち排水によって間隙水圧をゼロにする。このような操作を、せん断ひずみ振幅が2.0%になるまで行った。なお、せん断ひずみ速度は1%/minとした。

繰返しせん断の結果は図-4に示す $D_1-I_1$ の排水過程で生じた体積ひずみ $\varepsilon_{vd}$ とひずみ振幅 $\gamma_d$ の関係を、それぞれの $n$ について示している。 $D_1-I_1$ のみを考えたのは、この場合が正規圧密状態 $I_0$ で繰返しせん断をう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。

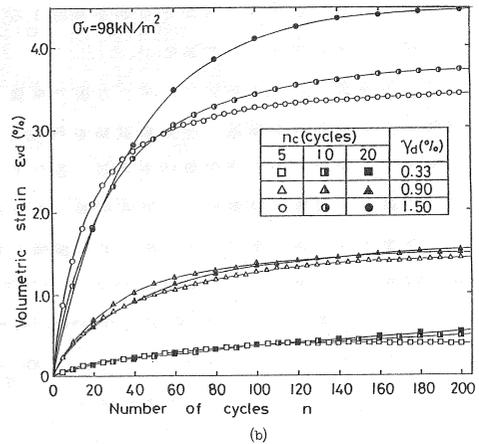
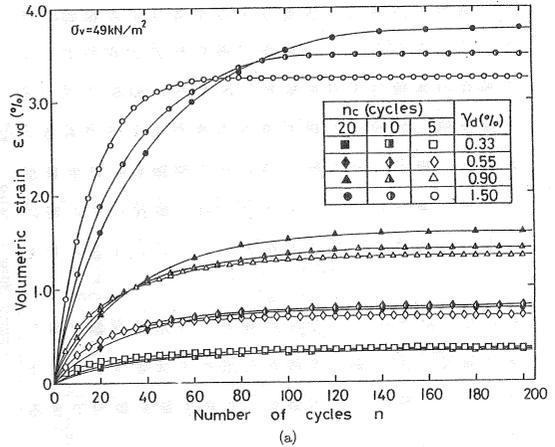


図-6  $\varepsilon_{vd}$  と  $n$  との関係

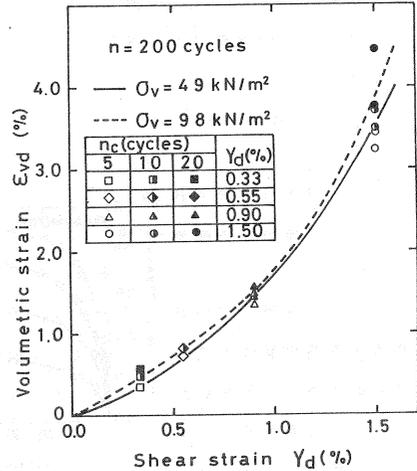


図-7  $\varepsilon_{vd}$  と  $\gamma_d$  との関係

また、図中の点線は、体積ひずみが各ひずみ振幅に対して  $n_c = 5, 10, 20$  の場合で得られているので、 $n_c = 1$  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値の約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うる。

すなわち、排水をともな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。

そこで、本実験では引き続き、同じ方法で準備された供試体について非排水繰返しせん断試験を行った。

その結果は、間隙水圧の発生量に着目し、各ひずみ振幅における繰返し回数と間隙水圧の関係が調べられた。

また、間隙水圧の発生量が、せん断ひずみ振幅と繰返し回数の関数として表せることを示した。

図-10は、圧密圧  $\sigma_v = 49 \text{ kN/m}^2, 98 \text{ kN/m}^2$  で、

繰返しせん断ひずみ  $\gamma_d = 0.33\%, 0.55\%, 0.90\%, 1.50\%$  として行った非排水繰返しせん断試験の結果を示す。

図中の各プロット点は実測値を示し、それらの測定値を  $n/(u/\sigma_v)$  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、次式が成立つ。

$$\frac{u}{\sigma_v} = \frac{n}{\alpha + \beta n} \quad (1)$$

図-10の曲線は(1)式の計算値を示す。計算値は実測値とよく一致している。このことから、ひずみ振幅一定の場合、間隙水圧発生量は(1)式によって近似できることがわかる。このことは乾燥砂に一定

振幅のせん断応力を与えた

とき、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があることと等価であり、体積ひずみと間隙水圧の発生がいつでも本質的に、土のダイラテンシーに関係していることを示すものである。なお、定数  $\alpha, \beta$  はひずみ振幅が大きくなるにとも

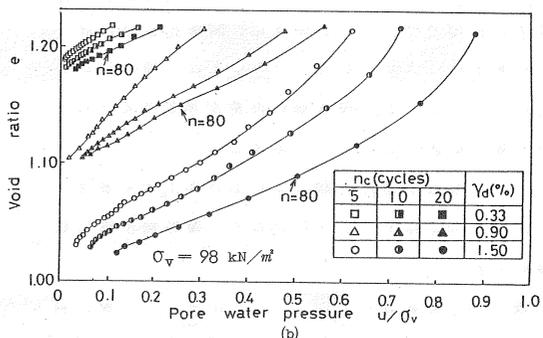
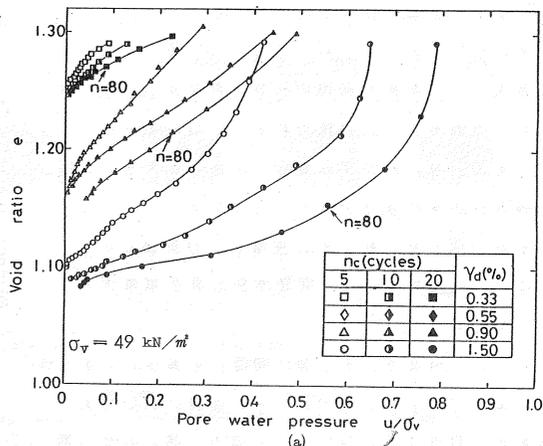


図-8 e と  $u/\sigma_v$  の関係

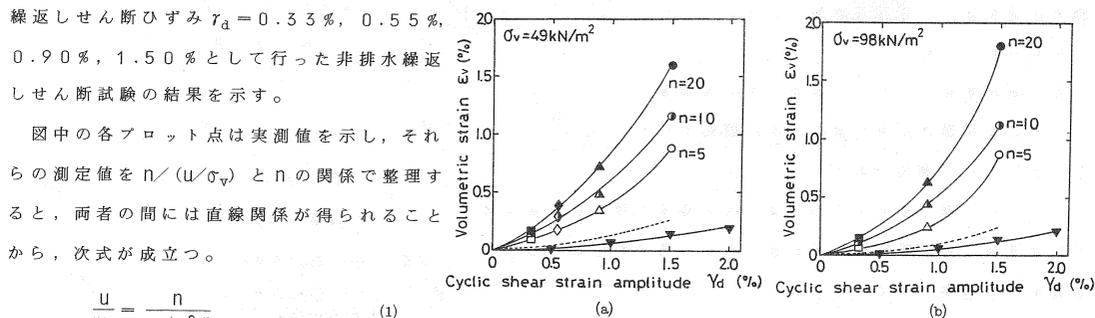


図-9  $\epsilon_v$  と  $\gamma_d$  との関係

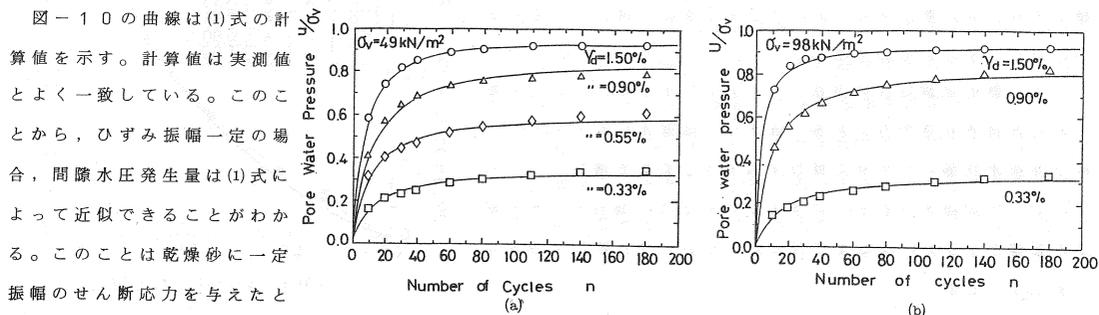


図-10  $u/\sigma_v$  と  $n$  との関係

なって小さくなる。

$$\alpha = A_1 - A_2 r_d \quad (2)$$

$$\beta = r_d / (B_1 + B_2 r_d) \quad (3)$$

なる式が成立つ。ここに、 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ は定数であり、本実験からは $A_1 = 2.9.30$ 、 $A_2 = 1.4.41$ 、 $B_1 = -0.22$ 、 $B_2 = 1.10$ が得られた。これらを用いて、(1)式を書き直すと、次の(4)式が得られる。

$$\frac{u}{\sigma'_v} = \frac{n}{(2.9.30 - 1.4.41 r_d) + (r_d / (-0.22 + 1.10 r_d)) n} \quad (4)$$

圧密圧  $\sigma'_v = 9.8 \text{ kN/m}^2$  の場合もほぼ同じような結果が得られ、(4)式の計算値と実測値はよい一致を示した。このことから、 $\alpha$ 、 $\beta$ は圧密圧の影響をうけず、(4)式は圧密圧に関係なく成立す

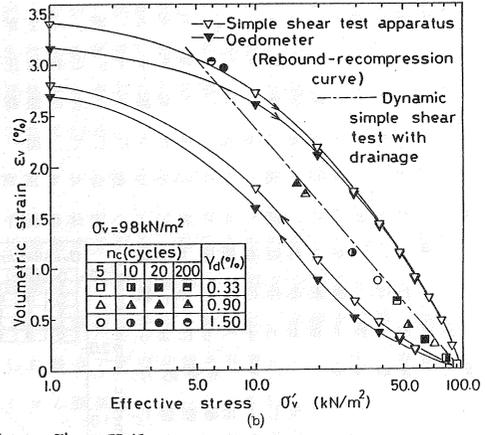
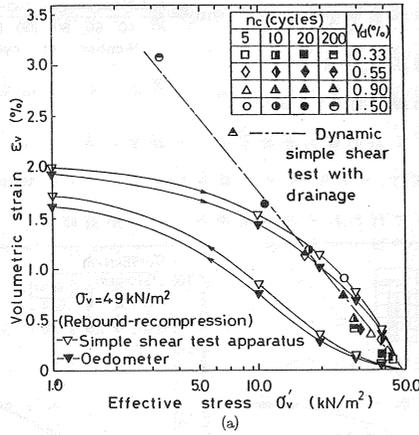


図-1.1  $\varepsilon_v$  と  $\sigma'_v$  の関係

ること、繰返しひずみ振幅に関係することが明らかとなった。

いま、体積圧縮係数  $m_s$  の粘土骨格に、 $\Delta \sigma'$ なる有効応力の増加があったとすれば、粘土の体積減少量は、 $m_s \cdot \Delta \sigma'_v$ となり、粘土の場合、間隙水の体積膨張係数  $m_w \ll m_s$ なる事実などを考慮すると、粘土の体積変化量  $\Delta \varepsilon_v$  は、次の(5)式で近似できる。

$$\Delta \varepsilon_v \doteq m_s \cdot \Delta \sigma' \quad (5)$$

同ような考え方によって、粘土骨格の体積膨張係数を  $m'_s$  とすると  $\Delta \varepsilon_v$  と  $\Delta \sigma'$  の関係は次のようになる。

$$\Delta \varepsilon_v \doteq m'_s \cdot \Delta \sigma' \quad (6)$$

(6)式は既に八木によって提案されているが、ここでは、これらの式を用いて非排水繰返しせん断試験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、図-6の値と比較・検討した。

$m_s$ 、 $m'_s$  を求めるために、圧縮試験装置および単純せん断試験装置を用いて、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、図-1.1である。図-1.1(a)は初期有効応力が  $4.9 \text{ kN/m}^2$ 、(b)は  $9.8 \text{ kN/m}^2$  の場合の結果を示している。

図より、圧密試験装置および単純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、圧密試験の供試体と異なっているが、両者の結果は比較的よく一致している。

また、図中の一点破線の直線で示されるのは、図-4に示した  $D_i - I_1$ 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、排水をともなった繰返しせん断試験の結果(図-8)から、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関係をプロットしたものである。この直線を式で表せば、次のとおりである。

$$\varepsilon_v = K - c'_c \log \sigma'_v \quad (7)$$

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

$$c'_c = c_c / (1 + e_0) \quad (8)$$

ここに、 $e_0$ は初期間隙比であり、既にのべたように、 $e_0$ の値は  $1.30$  ( $\sigma'_v = 4.9 \text{ kN/m}^2$ )、 $1.22$  ( $\sigma'_v =$

98 KN/m<sup>2</sup>)である。

非排水繰返しせん断中に発生する間隙水圧と繰返し回数との関係は、既に図-10に示したように求められている。

そこで、ある繰返し回数 $n$ のときの有効応力を $\sigma'_v - u$ として、図-10から求め、その値を図-11の横軸( $\sigma'_v$ )上にとる。そして、図-11のいずれかの曲線に着目して、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、 $\varepsilon_{vu}$ とする。図-12が、このようにして求められた $\varepsilon_{vu}$ と $n$ の関係の一例を示す。これは圧密圧 $\sigma'_v = 49$  KN/m<sup>2</sup>で、圧密試験装置を用いた試験のうちの除荷曲線(図-11(a))を用いて得られた結果である。同ようにして、図-11(a)の他の曲線を用いた結果が得られる。

また、図-10(b)と図-11(b)とを組合せて圧密圧 $\sigma'_v = 98$  KN/m<sup>2</sup>の場合の $\varepsilon_{vu}$ と $n$ との関係が得られる。

既にのべたように、図-4において一定体積条件下で行われる非排水繰返しせん断過程 $I_0 - D_1$ で生じる間隙水圧の上昇、いはいかえれば有効応力の減少は、いわば、排水条件のもとで、粘土の骨格が、粒子同志のすべりによって生じる体積減少 $I_0 - I_1$ と、有効応力の減少ともなう生じる体積膨張 $I_0 - D_1$ 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行われている。

以上の考えが実験によって立証されるか、どうかということと、立証するとしても $m_s$ 、 $m'_s$ のどちらを用いればよいかなどを検討する必要がある。このためには、排水をともなった繰返しせん断試験によって求められた $\varepsilon_{vd}$ と、先に求めた $\varepsilon_{vu}$ とを比較・検討すればよいことになる。

このような場合には、有効応力の減少ともなう体積膨張が問題となると考えられることから、通常、除荷曲線( $m'_s$ )を用いることが一般的である。そこで、図-11の圧密装置による膨張曲線を用いて求めた $\varepsilon_{vu}$ と $\varepsilon_{vd}$ とを比較した。その結果が、図-13である。

比較のために、再載荷曲線を用いて求めたような結果を図-14に示した。(a)図が $\sigma'_v = 49$  KN/m<sup>2</sup>、(b)図が $\sigma'_v = 98$  KN/m<sup>2</sup>の場合の結果であり、すべて繰返し回数10、30、100回における値同志で比較してある。

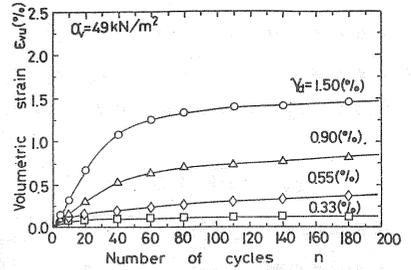


図-12  $\varepsilon_{vu}$ と $n$ の関係

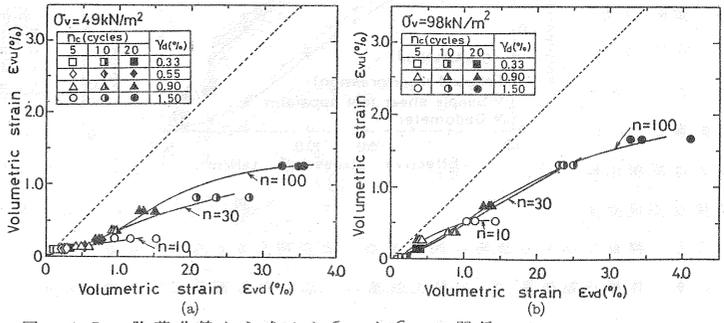


図-13 除荷曲線から求めた $\varepsilon_{vu}$ と $\varepsilon_{vd}$ の関係

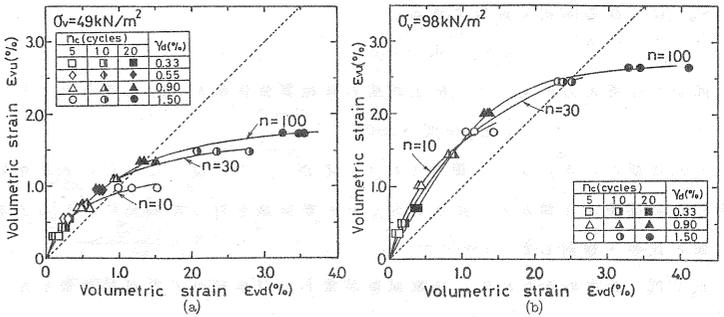


図-14 再載荷曲線から求めた $\varepsilon_{vu}$ と $\varepsilon_{vd}$ の関係

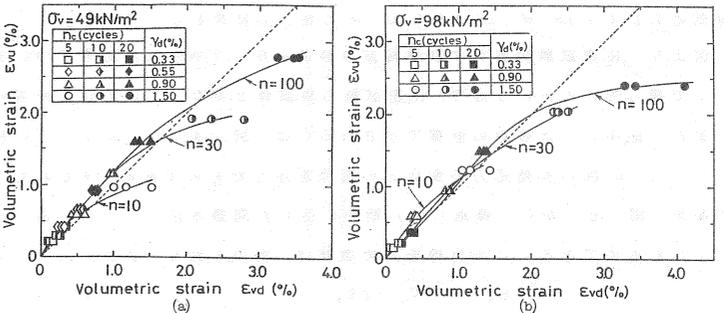


図-15 排水をともなった繰返しせん断試験の結果から求めた $\varepsilon_{vu}$ と $\varepsilon_{vd}$ の関係

これらの図より、 $\varepsilon_{vu}$ は $\varepsilon_{vd}$ の約1/2となっていることがわかる。すなわち、除荷曲線を用いた場合には、ひずみ振幅および繰返し回数の総和にかかわらず $\varepsilon_{vd}$ は $\varepsilon_{vu}$ より大きくなり、再載荷曲線を用いた場合、ひずみ振幅が1%以下では、 $\varepsilon_{vu}$ の方が多少大きくなる傾向があることがわかる。

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、排水をともなった繰返しせん断試験によって体積ひずみ $\varepsilon_{vd}$ 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、 $u = \varepsilon_{vd} / m_s^*$ の式を用いる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、除荷試験よりも再載荷試験を行う方が、粘性土のダイラテンシ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、排水をともな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関係から得られた直線から体積ひずみ $\varepsilon_{vu}$ を算出したが、 $\varepsilon_{vd}$ と一番よく一致することが、図-15によって示されている。

## 6. 結語

本論文では、繰返しせん断が与えられた飽和粘土の間隙水圧挙動の予測を、粘性土のダイラテンシ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実験およびその結果と考察をのべた。

その概略と得られた結論の大略は次のとおりである。すなわち、飽和カオリン粘土に、非排水状態で所定の繰返しせん断ひずみを与えた後、一旦排水し、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「排水をともなった繰返しせん断試験」という）を行った。

本実験は、非排水過程で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またげられた結果として発生するという考えから、繰返しせん断中のダイラテンシー特性を、より明確にするという目的で行われたものである。

その結果、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と考えられる。また、排水をともなった繰返しせん断試験では、累積ひずみは圧密圧にはあまり影響をうけずに、繰返しせん断ひずみ振幅に依存することが明らかになった。そして、同一のせん断ひずみ振幅では、 $n_c$ に無関係に、最終的には一定の間隙比に落ち着き、その状態は正規圧密曲線上にはなく、擬似過圧密状態にあると思われる。

さらに、これらの実験から、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と比べて大きいのは、繰返しせん断履歴の蓄積、いかえれば $\varepsilon_{vu} < \varepsilon_{vd}$ なる実験事実によるとの結論を得た。

また、飽和粘土の非排水繰返しせん断試験の結果から、間隙水圧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として、(1)、(2)、(3)式の形で表せ、圧密圧には無関係であることが明らかになった。

次に、非排水繰返しせん断過程での間隙水圧の上昇は、粘土の骨格構造における体積の減少と膨張が同時に生じ、体積が一定に保たれるために生じるとの考えから、発生した間隙水圧を、別途に行った除荷・再載荷試験から得た $m_s$ 、 $m_s^*$ を用いて体積ひずみ $\varepsilon_{vu}$ に換算し、それを排水をともなったせん断試験から直接算出された体積ひずみ $\varepsilon_{vd}$ と比較・検討した。

その結果、 $\varepsilon_{vu}$ は $\varepsilon_{vd}$ 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わかった。

## 参 考 文 献

- 1) H. B. Seed and C. K. Chan (1966): "Clay Strength Under Earthquake Loading Conditions" ASCE, Vol. 92, SM 2, pp. 53~78.
- 2) D. A. Sangrey, D. J. Henkel and M. I. Esrig (1969): "The Effective Stress Response of a Saturated Clay Soil to

Repeated Loading" Canadian Geotechnical Journal, Vol. 6, No. 3, pp. 241 ~ 252.

- 3) 松井 保, 小原秀夫, 伊藤富雄 (1977) : "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, 257号, pp. 41 ~ 51.
- 4) 大原資生, 松田 博 (1978) : "飽和粘土の動的強度について" 土木学会論文報告集, 247号, pp. 69 ~ 78.
- 5) 大原資生, 山本哲朗, 滝本邦彦 (1980) : "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, 297号, pp. 127 ~ 130.
- 6) 4)に同じ, または, 大原資生, 山本哲朗, 生田裕彦 (1982) : "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, 315号, pp. 75 ~ 82.
- 7) H. Oh-oka (1976) : "Drained and undrained stress-strain behavior of sands subjected to cyclic shear stress under nearly plane strain condition" 土質工学会論文報告集, Vol. 16, No. 3, pp. 19 ~ 31.
- 8) 八木則男 (1978) : "繰返しせん断による砂の体積変化と過剰間隙水圧" 土工学会論文報告集, 275号, pp. 79 ~ 90.