

繰り返し載荷によって生じる擬似過圧密粘土 の強度特性

大原 資生*・松田 博*・末岡 光樹**

Shear Strength of Quasi-Overconsolidated Clay Induced by Cyclic Loading

Sukeo O-HARA, Hiroshi MATSUDA, Kouki SUEOKA

Abstract

The clay consolidated after applying cyclic shear is in the state of quasi-overconsolidation. In order to investigate the characteristics of shear strength and of consolidation of quasi-overconsolidated clay, static shear tests and consolidation tests are performed, using the simple shear test apparatus. Then, the results are compared with the ones for the overconsolidated clay. As a conclusion, it is clarified that the quasi-overconsolidated clay induced by cyclic loading is affected with the disturbances of fabrics, compared with the overconsolidated clay induced under static conditions.

1. 緒 言

自然粘土地盤が、地震、波浪、交通荷重などによる繰り返しせん断を受けると、粘土層内に過剰間隙水圧が発生する。繰り返しせん断直後においては、ほぼ非排水状態が保たれるために、過剰間隙水圧は残留する。しかし、長期間経過すると、次第に残留間隙水圧は消散し、それに伴って粘土地盤の沈下が生じる。繰り返しせん断によって発生する過剰間隙水圧は、初期有効拘束圧の80%にも達する場合がある¹⁾ことから、繰り返しせん断後の圧密沈下量は、大きく無視することはできない。

結局、長期的にみれば、繰り返しせん断を受けた粘土地盤は、発生した過剰間隙水圧の消散に伴う圧密沈下が生じることになる。そして、圧密終了後には、有効鉛直圧力が正規圧密状態と等しいにもかかわらず、間隙比が正規圧密状態のそれに比較して小さい状態、すなわち、過圧密状態にあるものと考えられる。しか

し、この場合は、先行圧縮を受けて生じた過圧密粘土地盤や、二次圧縮によって間隙比が減少したような粘土地盤とは状態径路が異なるために、それらの力学特性には本質的に相違があるものと予想される。

本研究は、このような繰り返しせん断によって生じる過圧密粘土を、特に擬似過圧密粘土と呼び、その強度特性を明らかにするために、先行圧縮を受けて生じた通常の過圧密粘土の強度特性と比較検討したものである。また、正規圧密粘土が擬似過圧密粘土に至る過程、すなわち、繰り返しせん断によって発生する過剰間隙水圧およびその消散に伴う沈下挙動についても検討を行っている。

2. 状態径路の異なる粘土

Fig. 1は、正規圧密状態にある粘土が過圧密状態に至る過程を、間隙比と有効鉛直圧力の関係から概念的に示したものである。

図中、N.C.L.は正規圧密曲線を表わしており、正規圧密された粘土の状態はN点にある。この状態の粘土に、非排水状態で繰り返しせん断が作用すると、過剰間隙水圧の上昇により、N点からQ点に至る。次に、

* 土木工学科

** 山口県庁

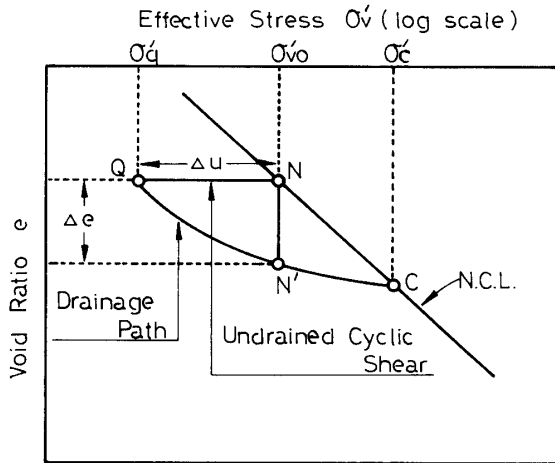


Fig. 1 Schematic Diagram of the State Path.

Q点の状態にある粘土を排水状態にすれば、過剰間隙水圧の消散に伴って圧密沈下が起こり、Q点からN'点に至る。また、このとき、 $\overline{NN'}$ に相当する間隙比の減少が生じる。このように、N-Q-N'の状態径路を通してN点の状態にある粘土を、著者らは「繰り返し荷重によって生じる擬似過圧密粘土」と呼ぶことにする。

一方、N点の状態にある正規圧密粘土を排水状態にして荷重すると、圧密によりC点に至る。そして、この状態から初期有効鉛直圧力 σ'_{vo} まで除荷すれば、N'点に至る。このようなN-C-N'の状態径路を通してN'点にある粘土は、過圧密状態にある。

また、N-N'の状態径路を通してN'点にある粘土は、Bjerrumの言う²⁾“Normally consolidated aged clay”に相当するものと考えられる。

このような、N点からN'点に至る状態径路のうち、本研究では、N-Q-N'およびN-C-N'の状態径路を通った粘土について検討した。

3. 実験装置および実験方法

3.1 実験装置

本研究に用いた実験装置は、電気油圧サーボ式動的単純せん断試験機である。

せん断箱はKjellman型であり、Fig. 2にその構造を示した。このせん断箱の上部ペダスタル③の水平変位は拘束されており、せん断箱内の供試体のせん断変形は、せん断箱の下部ペダスタル⑫を水平方向に移動することにより与えられる。また、せん断箱内の供試体はゴムスリーブで包まれ、その周りには、内径75.2mm、外径96.0mm、厚さ2.0mmのプラスチックリングが15枚積み重ねられている。このため、供試体は、せん断変形

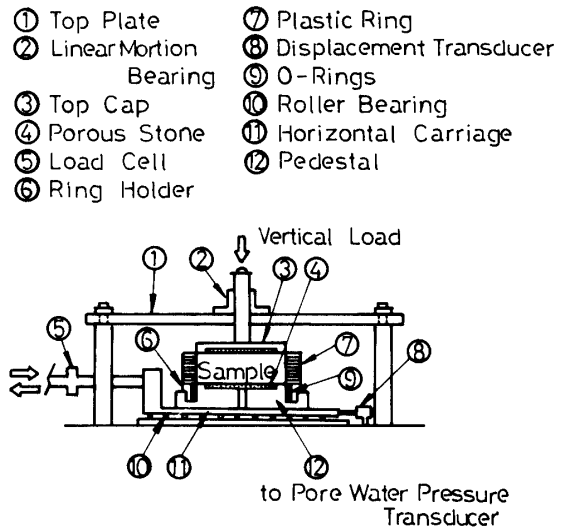


Fig. 2 Shear Box of Simple Shear Test Apparatus.

に対してはほぼ自由であるが、横方向の膨れ出しは拘束される。

試験に際しては、供試体のせん断抵抗力を、水平伝達棒に取り付けたロードセル⑤で測定し、また、供試体内に発生する過剰間隙水圧は、供試体下部よりポーラスストーンを通して銅管で圧力変換器に導き測定した。

3.2 試料および供試体

3.2.1 試料

本研究に用いた試料は、気乾燥状態の粉末状カオリン粘土である。この試料の物理諸定数をTable Iに、粒径加積曲線をFig. 3に示した。

Table I. Physical Properties of Kaolinite Clay

Specific Gravity	G _s	2.718
Liquid Limit	W _L (%)	53.4
Plastic Limit	W _p (%)	28.5
Plasticity Index	I _p	25.0
Average Grain Diameter	D ₅₀	3.8 μ

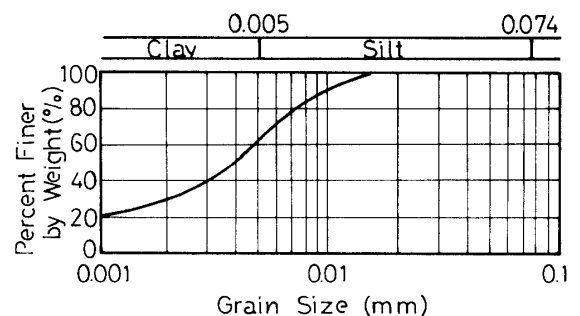


Fig. 3 Grain Size Distribution Curve.

3.2.2 供試体

気乾燥状態の粉末状カオリン粘土に、含水比が80%になるように脱気水を加え、よく攪拌する。攪拌された試料は水分の蒸発を防ぐために、ポリ袋で覆って24時間放置する。その後、この試料の飽和度を高めるために、真空装置を用いて約30分間脱気を行う。次に、先述したせん断箱のゴムスリーブの中に、脱気した試料を3層に分けて詰め、所定の圧密圧力で22時間圧密する。なお、圧密圧力は $\sigma'_{v0} = 49\text{kPa}$ とした。

このようにして得られた供試体は、直径75mm、高さ約20mmの円板状であり、間隙比は $e_0 = 1.33 \pm 0.02$ である。

3.3 実験方法

前述の方法で作製された正規圧密粘土供試体を擬似過圧密状態にするために、供試体に非排水状態のもとで、所定の繰り返しせん断を与え、その際に生じた過剰間隙水圧を排水によって消散させた。繰り返しせん断時のひずみ振幅は、0.01%から3.0%の間で変化させ、繰り返し回数は最大200回までとした。

一方、供試体を過圧密状態にする場合には、正規圧密粘土供試体を排水状態にして、荷重を σ_c まで増加し、再び σ'_{v0} まで除荷した。なお、過密比 ($O.C.R. = \sigma_c / \sigma'_{v0}$) は、1から6までの間で変化した。

このような過圧密粘土供試体および擬似過圧密粘土供試体に対して、静的単純せん断試験、圧密試験を行った。静的単純せん断試験は、両供試体に対して、非排水定ひずみ速度せん断を行い、せん断中には、せん断抵抗力および間隙水圧を測定した。また、圧密試験は、両供試体を、まず有効鉛直圧力 $\sigma'_v = 9.8\text{kPa}$ まで除荷した後、荷重増加率1で段階荷荷を行った。各荷重段階における荷荷期間は一次圧密終了時までとし、各段階の間隙比と有効鉛直圧力の関係から $e \sim \log \sigma'_v$ 曲線を求めた。

4. 実験結果および考察

4.1 繰り返しせん断によって発生する過剰間隙水圧について

正規圧密粘土供試体に対して、非排水状態で繰り返しせん断を与えると、過剰間隙水圧は繰り返し回数が増すにつれて増加する。既に、繰り返し回数と間隙水圧比の間には、双曲線の関係にあることがわかっており、³⁾ ここでも、繰り返し回数と間隙水圧比の双曲線近似を行った。

Fig.4は、繰り返し回数 n と間隙水圧比 U_{dyn} / σ'_{v0} の

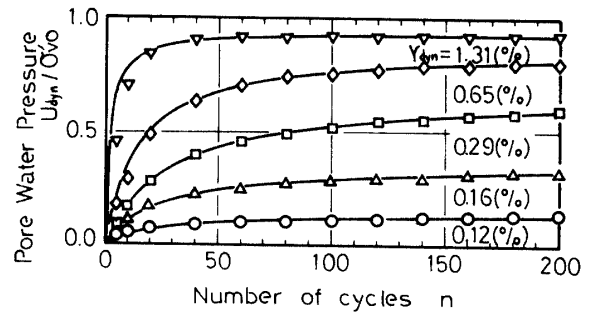


Fig. 4 Pore Water Pressure Induced by Cyclic Shear.

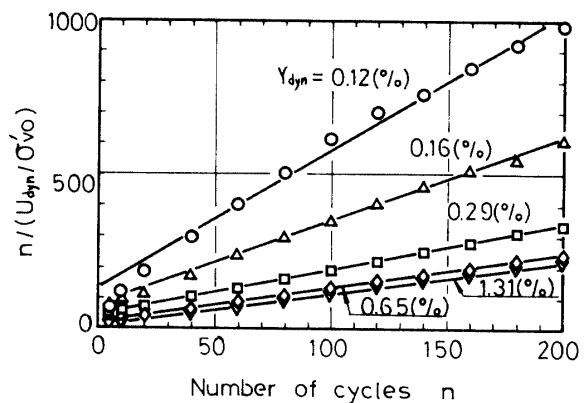


Fig. 5 Relationships between $n / (U_{dyn} / \sigma'_{v0})$ and n .

関係を示したもので、図中の記号は実測値である。ここで、繰り返し回数と間隙水圧比の関係を、 $n / (U_{dyn} / \sigma'_{v0})$ と n の関係で整理し直すと、Fig.5に示したように、いずれの場合においても両者は直線関係となる。すなわち、繰り返し回数と間隙水圧比の関係は次式で表わせる。

$$U_{dyn} / \sigma'_{v0} = n / (\alpha + \beta \times n) \quad (1)$$

ここに、 α はFig.5における直線と縦軸の切片の値、 β は直線部分の勾配であり、繰り返しせん断時のひずみ振幅に依存する。Fig.4の実線は、(1)式によって得られたものであり、実測値と非常に良く一致している。

また、 α 、 β の値は繰り返しせん断時のひずみ振幅に依存するので、Fig.6、Fig.7に、それぞれ α 、 β とひずみ振幅 γ_{dyn} の関係を示した。図より、 α 、 β とひずみ振幅の関係は次式で表わすことができる。

$$\alpha = A \times \gamma_{dyn}^m \quad (2)$$

$$\beta = \gamma_{dyn} / (B + C \times \gamma_{dyn}) \quad (3)$$

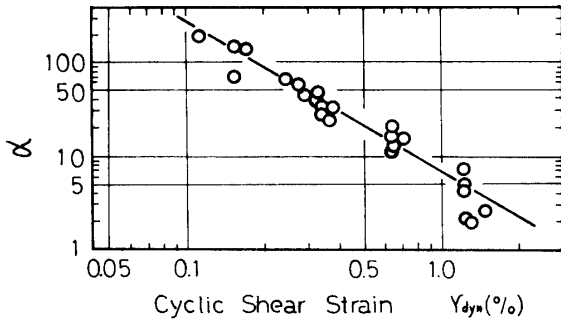


Fig. 6 α versus Cyclic Shear Strain Amplitude.

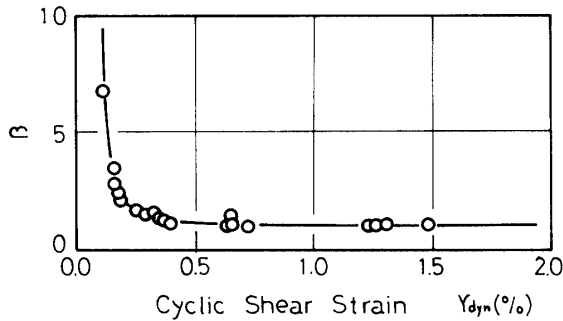


Fig. 7 β versus Cyclic Shear Strain Amplitude.

ここに、A、B、C、mは定数であり、本研究に用いた試料では、この値はA=6.80、B=-0.11、C=1.03、m=-1.61となった。なお、この定数の値は、試料や供試体の間隙比などによって相違するものと考えられ、この点については、さらに研究の必要がある。また、既に α と γ_{dyn} は、 $\gamma_{dyn}=0.33\sim 1.50\%$ の範囲内で直線関係になることが明らかとなっている³⁾が、本研究におけるような、さらに広い範囲のひずみ振幅(0.01~3.00%)に対しては、(2)式の関係が適切であると思われる。

(1)式に、(2)式および(3)式を代入すると、

$$U_{dyn}/\sigma'_{vo} = n / [A \times \gamma_{dyn}^m + \{\gamma_{dyn}/(B+C) \times \gamma_{dyn}\} \times n] \quad (4)$$

となり、繰り返しせん断によって発生する過剰間隙水圧は、繰り返しせん断前の供試体の状態が等しい場合には、繰り返し回数とひずみ振幅の関数として表わされる。すなわち、(4)式を用いれば、正規圧密粘土供試体に、一定振幅のひずみが任意の回数作用した場合、発生する過剰間隙水圧の値を推定することが可能である。

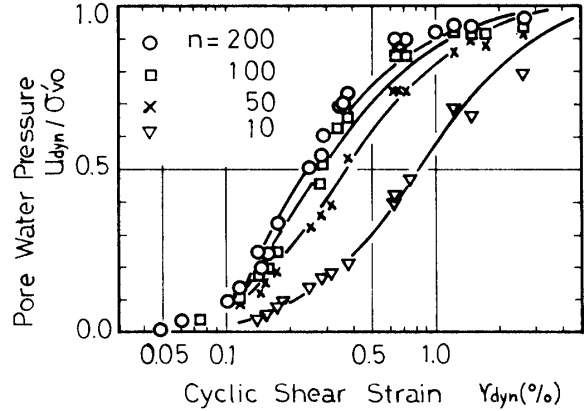


Fig. 8 Relationships between U_{dyn}/σ'_{vo} and γ_{dyn} .

Fig. 8は、ひずみ振幅 γ_{dyn} と間隙水圧比 U_{dyn}/σ'_{vo} の関係を、繰り返し回数が10、50、100、200回の場合について示したものである。図中の記号が実測値を表わし、実線が(4)式によって得られたものである。図より、繰り返し回数が200回の場合、繰り返しせん断によって発生する過剰間隙水圧は、ひずみ振幅が0.1%未満では、初期有効鉛直圧力の約10%までしか上昇しないが、0.1%以上になると急激に大きくなっている。しかし、ひずみ振幅が1.0%以上になると一定値に落ち着く傾向がみられ、最終的には、初期有効鉛直圧力の95%まで上昇している。また、ひずみ振幅が0.05%付近より小さくなると、過剰間隙水圧はほとんどゼロである。すなわち、粘土地盤に繰り返しせん断が作用した場合、過剰間隙水圧が全く生じないようなひずみ振幅が存在するのである。その値は、今回用いた試料では、ほぼ0.05%となる。

このことについて松井⁴⁾は、動的三軸試験機を用いて一定振幅の繰り返しせん断応力付加によって生じる間隙水圧を測定し、間隙水圧が生じないひずみ振幅は 10^{-3} 程度であると述べており、本研究により得られた結果と近い値になっている。

4.2 過剰間隙水圧の消散に伴う圧密沈下量

繰り返しせん断によって発生した過剰間隙水圧は、排水によって消散し、そのとき圧密が生じる。

Fig. 9は、正規圧密粘土供試体に繰り返しせん断を行った際に発生する過剰間隙水圧を、消散させたときに生じる間隙比の変化量 Δe と、 $\log \{\sigma'_{vo}/(\sigma'_{vo}-U_{dyn})\} = \log \{1/(1-U_{dyn}/\sigma'_{vo})\}$ の関係を示したものである。図中には、繰り返しせん断時の繰り返し回数(n=10、50、100、200回)とひずみ振幅($\gamma_{dyn}=0.01\sim 3.00\%$)を種々変化させた場合の結果を示している。また、 \log

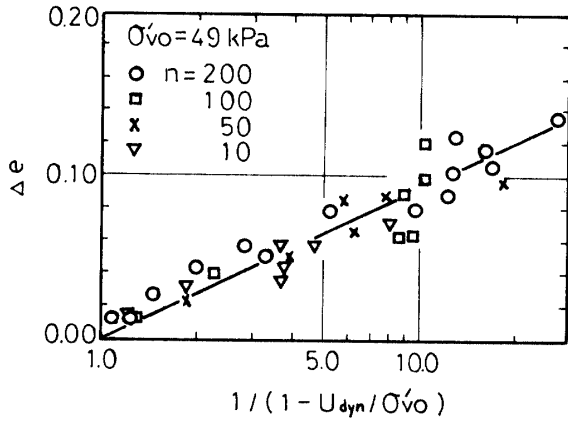


Fig.9 The Change of the Void Ratio due to the Dissipation of the Pore Water Pressure.

$\{1/(1-U_{dyn}/\sigma'_{vo})\}$ は、 $e \sim \log \sigma'_v$ 曲線上における過剰間隙水圧の変化量、すなわち、有効応力の減少量を対数表示したものである。図より、それぞれの点はほぼ一直線上にあるので、 Δe と $\log\{1/(1-U_{dyn}/\sigma'_{vo})\}$ は、繰り返しせん断時の繰り返し回数、ひずみ振幅、初期有効鉛直圧力の相違によらず、直線関係にあると言える。また、このことより、繰り返しせん断後の排水過程で生じる圧密沈下量は、繰り返しせん断中に生じる過剰間隙水圧の大きさによって一義的に決まることになる。さらに、両者が直線関係になることから、この直線の勾配は圧縮指数に対応する。そこで、著者らは、この直線の勾配を、特に“繰り返しせん断を受けた粘土の圧縮指数”と呼び C_{avn} で表わす。Fig. 9の直線の勾配より C_{avn} を求めると0.095となり、これは標準圧密試験より得られた圧縮指数 $C_c=0.27$ の約1/3、除荷・再載荷試験より得られた膨潤指数 $C_s=0.04$ の約2.4倍となっている。

繰り返しせん断後の圧縮指数 C_{avn} を定義することにより、繰り返しせん断後の間隙比の変化量 Δe は、次式のように表わすことができる。

$$\Delta e = C_{avn} \times \log\{1/(1-U_{dyn}/\sigma'_{vo})\} \quad (5)$$

さらに、体積ひずみ ϵ_v は、

$$\epsilon_v = C_{avn} / (1 + e_0) \times \log\{1/(1-U_{dyn}/\sigma'_{vo})\} \quad (6)$$

となる。ここに、 e_0 は供試体が繰り返しせん断を受ける前の間隙比である。また、(5)式および(6)式中の U_{dyn}/σ'_{vo} は、既に、(4)式によって示されている。従って、繰り返しせん断後に生じる体積ひずみ ϵ_v は、繰り返し回数とひずみ振幅によって表わすことができる。

Fig.10は、繰り返しせん断後に生じる体積ひずみ ϵ_v

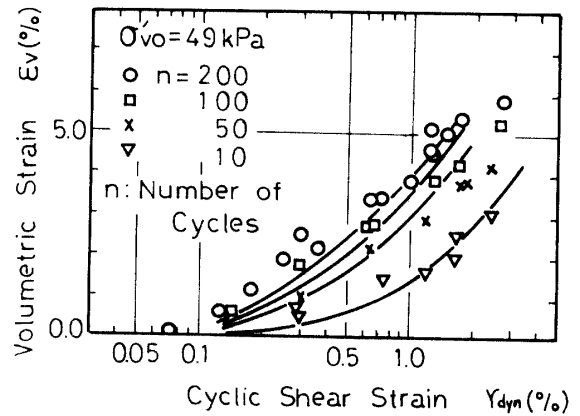


Fig.10 Settlement Induced by Cyclic Shear Strain.

と繰り返しせん断ひずみ振幅 γ_{avn} の関係を、繰り返しせん断時の繰り返し回数が10, 50, 100, 200回の場合について示したものである。図中の記号が実測値を表わし、実線が(6)式によって得られたものである。両者はよく一致しているが、いずれの場合においても、計算値は、 γ_{avn} が大きくなると最終的に一定値に落ち着く傾向がみられる。

4.3 擬似過圧密粘土と過圧密粘土の圧密沈下量の対応

Fig.1のN点の状態にある正規圧密粘土が、N-Q-N'の状態径路を通して圧密沈下する場合、その沈下ひずみの大きさは、(6)式によって、繰り返しせん断時の繰り返し回数およびひずみ振幅の関数として表わすことができた。一方、N-C-N'の状態径路を通して沈下・膨張する場合、 $\overline{NN'}$ に相当する沈下ひずみは次式で表わすことができる。

$$\epsilon_v = (C_c - C_s) / (1 + e_0) \times \log \text{O.C.R.} \quad (7)$$

ここに、 e_0 はFig.1のN点の状態にある正規圧密粘土の間隙比、 C_c は圧縮指数(0.27)、 C_s は膨潤指数(0.04)、O.C.R.は過圧密比である。

従って、(6)式および(7)式により、正規圧密状態から擬似過圧密状態又は過圧密状態に至るときに生じる体積ひずみの推定が可能である。(6)式と(7)式が等しいとすれば

$$\text{O.C.R.} = (1 - U_{dyn}/\sigma'_{vo})^{-C_{avn}/(C_c - C_s)} \quad (8)$$

となり、擬似過圧密粘土および過圧密粘土を作製する際に、両者の間隙比が等しくなるようなO.C.R.の値を求めることができる。すなわち、擬似過圧密粘土と過

圧密粘土の間隙比が等しくなるように(8)式によってOCRを設定すると、両者の強度特性、圧密特性を比較する際に、間隙比の影響を除くことができるのである。

4.4 擬似過圧密粘土と過圧密粘土の $e \sim \log \sigma_v$ 曲線の比較

Fig.11, Fig.12は、擬似過圧密粘土および過圧密粘土に対して、有効鉛直圧力 $\sigma_v = 9.8 \text{ kPa}$ まで除荷後、段階載荷することによって得られた $e \sim \log \sigma_v$ 曲線である。図中の●印は、Fig.11においては、荷重載荷を行う直前、Fig.12においては、繰り返しせん断を与える直前の正規圧密状態を表わしている。また、図中の○印が、それぞれ過圧密状態、擬似過圧密状態を表わしている。なお、両図を比較するにあたって、間隙比の影響を除くために、両粘土供試体の間隙比はほぼ等しくなっている。

図より、過圧密粘土の除荷・再載荷曲線がよくみられるヒステリシスループを描いているのに対して、擬似過圧密粘土の場合は、除荷曲線と再載荷曲線がほぼ一致しており、その傾きは過圧密粘土の場合に比較して小さくなっている。また、繰り返しせん断時のひずみ振幅が2.75%である擬似過圧密粘土はほとんど膨張していない。

これは、明確ではないが、繰り返しせん断によって供試体に生じるひずみは、土粒子間のずれによるもので、通常の載荷によって生じる骨格構造のひずみによって生じるものではない。そのためにひずみに回復性

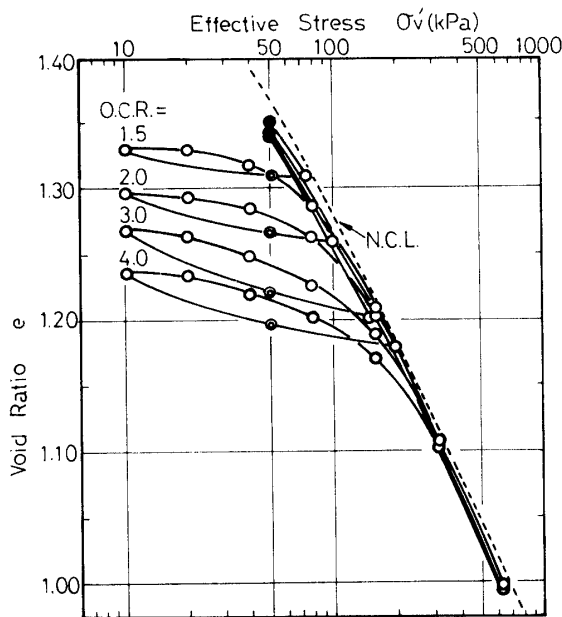


Fig.11 $e \sim \log \sigma_v$ Curves for the Overconsolidated Specimen.

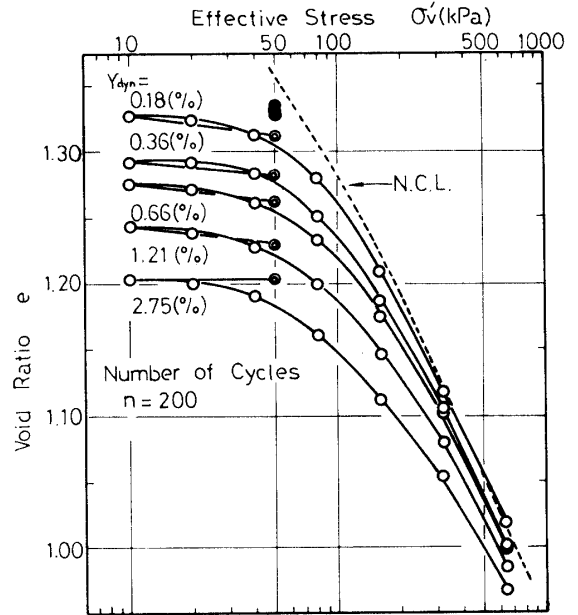


Fig.12 $e \sim \log \sigma_v$ Curves for the Quasi-Overconsolidated Specimen.

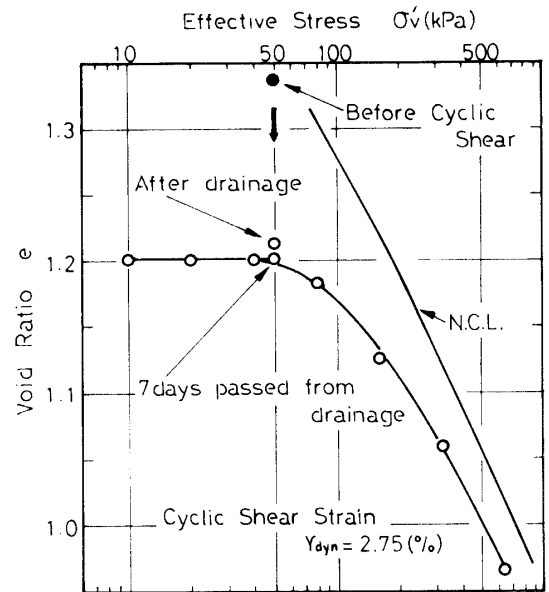


Fig.13 Effects of Aging.

が少なくなったものと考えられる。

また、過圧密粘土の $e \sim \log \sigma_v$ 曲線は、先行圧密圧力を越えたあたりから、正規圧密曲線 (N.C.L.) にほとんど一致する。しかし、擬似過圧密粘土の $e \sim \log \sigma_v$ 曲線は、先行圧密圧力をこえても正規圧密曲線に一致せず、この傾向は、繰り返しせん断時のひずみ振幅が大きい粘土ほど顕著にあらわれている。これは、Schmertmann⁵⁾ が示した、攪乱された粘土の $e \sim \log \sigma_v$ 曲線の特性に類似している。

Fig.13は、擬似過圧密粘土に対して、有効鉛直圧力を一定に保った状態で、7日間、排水状態で放置し、その後圧密試験を行った結果である。この場合も、 $e \sim \log \sigma_v$ 曲線は正規圧密曲線には一致せず、繰り返しせん断時の攪乱の影響は依然として残っている。すなわち、7日間という短い期間ではあるが、過圧密粘土が有する構造組織への回復は生じないのである。

結局、D.M.Potts⁶⁾が述べているように、粘土が繰り返しせん断を受けると、その $e \sim \log \sigma_v$ 曲線は、正規圧密曲線とは異なった新たな漸近線を有するものと考えられる。

4.5 擬似過圧密粘土と過圧密粘土の静的強度の比較

擬似過圧密粘土と過圧密粘土に対して静的単純せん断試験を行い、静的せん断ひずみ $\gamma_{st}=15\%$ におけるせん断抵抗力を静的強度と定めた。

Fig.14は、正規圧密粘土の静的強度 τ_N に対する擬似過圧密粘土および過圧密粘土の静的強度 τ の比 τ/τ_N (以後、この値を強度比と呼ぶ)と、静的せん断開始時の両粘土供試体の間隙比の関係を示したものである。また、静的せん断ひずみ $\gamma_{st}=15\%$ における間隙水圧比と間隙比の関係を図.15に示した。図中、●印が正規圧密状態、●印が過圧密状態、その他の記号が擬似過圧密状態を表わしている。

間隙比が大きい場合、言い換えると、繰り返しせん断および過圧密による正規圧密状態からの間隙比の変化量が小さい場合には、両者の強度比の値には明確な差は見受けられない。しかし、間隙比が1.26付近より小さくなると、両者の強度比の値に差が生じ始め、過圧密粘土の強度比の方が明らかに大きくなっている。また、この傾向は、間隙比が小さくなるに従って、より顕著になっており、過圧密粘土の強度比は、擬似過圧密粘土のそれに比較して、間隙比1.20で約1.2倍となっている。

すなわち、擬似過圧密粘土と過圧密粘土の静的強度を比較すると、正規圧密状態からの間隙比の変化量が小さい場合には、両者の間にほとんど差はないが、間隙比の変化量が大きくなると、擬似過圧密粘土の静的強度の方が次第に小さくなるのである。この理由については、擬似過圧密粘土の間隙比が小さくなるということは、繰り返しせん断時の攪乱の程度が増すことを意味しているので、このことによって両者の強度比が相違するものと考えられる。

一方、静的せん断中に生じる間隙水圧比についても、Fig.15に示したように、静的強度の場合とほぼ同じ間隙比以下になると、過圧密粘土の間隙水圧比の方が小

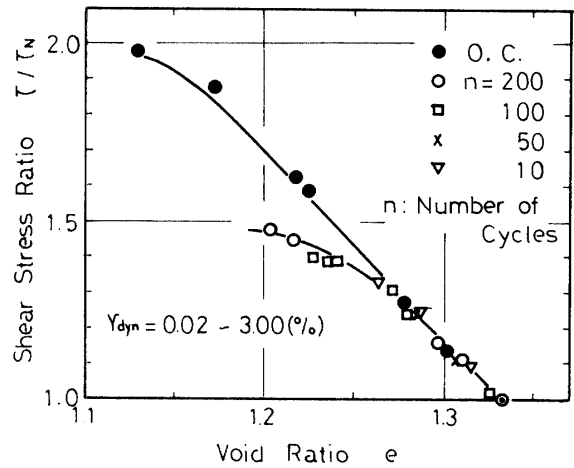


Fig.14 Comparison of the Static Shear Strength with the Void Ratio.

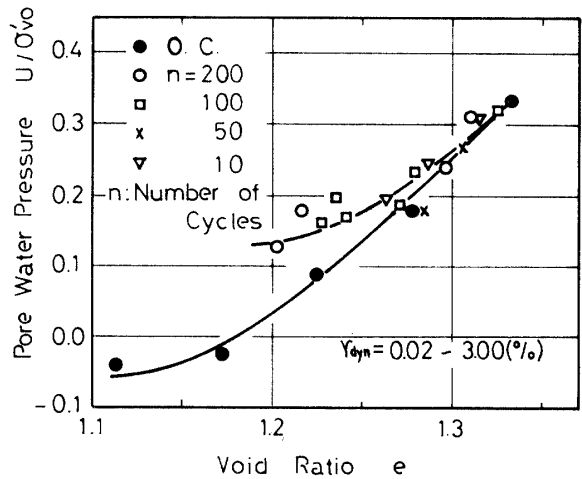


Fig.15 Comparison of the Pore Water Pressure Induced by the Static Shear with the Void Ratio.

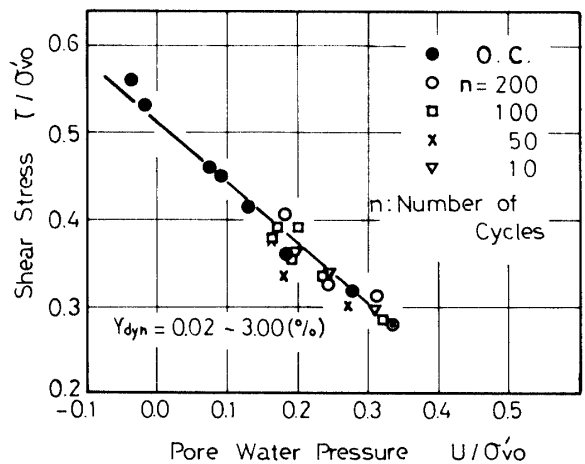


Fig.16 Relationships between τ/σ'_{v0} and u/σ'_{v0} .

さくなっている。そこで、静的せん断中に発生する間隙水圧の影響を考慮するために、初期有効鉛直圧力 σ'_{v0} に対する静的強度 τ の比 τ/σ'_{v0} と間隙水圧比 U/σ'_{v0} の関係をFig.16に示した。

図より、 τ/σ'_{v0} と U/σ'_{v0} はほぼ直線関係にあり、過圧密粘土および擬似過圧密粘土による相違は見受けられない。このことより、両者の静的せん断強度は、有効応力規準において等しいと言える。また、これと同様な結果は、八木ら⁷⁾によっても得られている。

5. 結 語

動的単純せん断試験装置を用いて、繰り返しせん断によって生じる擬似過圧密粘土と先行圧縮を受けて生じた過圧密粘土の強度特性および圧密特性を比較検討した。また、繰り返しせん断によって発生する過剰間隙水圧およびその消散に伴う沈下挙動についても検討した。その結果、以下のような結論を得た。

- (1) 飽和粘土に繰り返しせん断を作用させても、あるひずみ振幅以下では過剰間隙水圧が全く発生しない。
- (2) 過剰間隙水圧の消散に伴って生じる圧密沈下量は、繰り返しせん断時に発生する過剰間隙水圧の大きさによって決まる。
- (3) 過剰間隙水圧の消散によって生じる間隙比の変化量 Δe は、 $\log\{1/(1-U_{avn}/\sigma'_{v0})\}$ と直線関係にあり、この直線の勾配は圧縮指数 C_c と同様なパラメーター C_{avn} として定義できる。
- (4) 繰り返しせん断によって生じる擬似過圧密粘土の $e \sim \log \sigma'_v$ 曲線は、過圧密粘土のそれと異なり、圧密圧力が先行圧密圧力を越えても、正規圧密曲線には一致しない。さらに、この傾向は繰り返しせん断時のひずみ振幅が大きい場合ほど顕著である。
- (5) 繰り返しせん断によって生じる擬似過圧密粘土の全応力規準による静的せん断強度は、繰り返しせん断後の圧密沈下量が小さければ過圧密粘土のそれと一致

する。しかし、圧密沈下量が大きくなれば、過圧密粘土の静的せん断強度の方が大きくなる。

- (6) 繰り返しせん断によって生じる擬似過圧密粘土の有効応力規準による静的せん断強度は、過圧密粘土のそれとほぼ一致する。

なお、本研究を行うに当っては、当時の本学学生 浅井和博、日吉厚夫、内田哲理の諸君の助力を得た。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 大原資生, 山本哲朗, 滝本邦彦: 繰り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 (1980) pp.127~130
- 2) Bjerrum L.: Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of structures, *Geotechnique*, 17, 3 (1967) pp. 63~117
- 3) 大原資生, 松田博, 近藤泰生: 排水を伴った飽和粘土の繰り返し単純せん断試験, 土木学会論文報告集, 352 (1984) pp. 149~157
- 4) 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, 257 (1977) pp. 41~51
- 5) Schmertmann, J.H.: The undisturbed consolidation behavior of clay, *Trans. ASCE*, 120 (1955) pp. 1201~1233
- 6) D.M.Potts: Behavior of clay during cyclic loading, *Developments in Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (1985) pp.105~138
- 7) 八木則男, 矢田部龍一: 乱れを受けた飽和粘性土の力学特性, 土木学会論文報告集, 352 (1984) pp.179~186

(昭和61年4月2日受理)