

繰返し载荷に伴う擬似過圧密粘土の特性

CHARACTERISTICS OF QUASI-OVERCONSOLIDATED CLAY INDUCED BY CYCLIC LOADING

大原資生*・松田 博**・末岡光樹***

By Sukeo O-HARA, Hiroshi MATSUDA and Kouki SUEOKA

The clay subjected to cyclic shear with drainage 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 were carried out, using the simple shear test apparatus. Then, the results were compared with the ones for the overconsolidated clay. As a conclusion, it was clarified that quasi-overconsolidated clay induced by cyclic loading is affected with the disturbances of fabrics, comparing with the overconsolidated clay induced under static conditions.

1. 緒 言

粘土地盤の動的強度は間隙比、過圧密比、粘着力、内部摩擦角、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^{1)~7)}。

著者らの繰返し単純せん断試験による実験では、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支配されるという結果が得られている。

繰返しせん断中に生じる間隙水圧は、静的せん断中のその2~4倍であり、初期有効拘束圧の80%にも達する。このため、繰返しせん断終了後の排水過程で沈下が生じる。

この過程を図示すれば、Fig.1のとおりである。すなわち、図中のNCLは正規圧密曲線であり、N点は繰返しせん断前の供試体の状態を示している。この状態の供試体に非排水状態で繰返しせん断を加えると、間隙水圧が上昇しQ点に至る。次の排水過程ではQからN'に

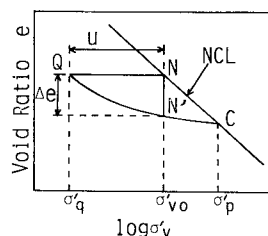


Fig.1 Void ratio-effective stress relations.

至り、そのとき $\overline{NN'}$ に相当する間隙比の減少が生じる。N'における有効圧はNのそれと同じであるから、この間隙比の減少は繰返しせん断によるものと考えることができる。しかもN'の状態は過圧密状態とみなし得る。結局、繰返しせん断を受けた粘土層は沈下を生じ、過圧密状態となることが予想される。しかし、このような過圧密状態は静的過程によって生じた過圧密状態と応力履歴が全く異なるため、その特性が全く同じであるかは明らかでない。そこで、著者らは繰返しせん断によって生じた過圧密状態を擬似過圧密状態といい、通常の過圧密状態と比較し、その類似点、相違点を調べた。

本実験では、動的単純せん断試験機を用い、過圧密された飽和粘土の圧密試験および静的単純せん断試験を行い、擬似過圧密された飽和粘土の実験結果と比較し、両

* 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)

*** 学生会員 山口大学大学院工学研究科土木工学専攻
(同上)

者の圧密特性および静的せん断特性の相違について検討した。なお、今回比較に用いた擬似過圧密粘土は、繰返しせん断ひずみを200回与えた後、排水して過剰間隙水圧を消散させることにより作成したもので、繰返しせん断ひずみ振幅の大きさを変化した場合について、圧密試験および静的単純せん断試験を行った。

両者の比較は、圧密特性では e - $\log \sigma_v$ 曲線について検討し、強度特性では静的せん断強度について検討した。

2. 試料および供試体

本実験に用いた試料は、以前から用いている⁶⁾気乾状態の粉末状カオリン粘土で、主な物理諸定数は、土粒子の比重2.72、液性限界53.5%、塑性限界28.5%である。

このカオリン粘土に、含水比が約80%になるように脱気水を加え、よく攪拌した後、水分の蒸発を防ぐため容器をポリ袋で覆って約24時間放置する。その後、容器に入れたまま真空室に入れて約30分間脱気を行い、せん断箱のゴムスリーブの中に3層に分けて詰める。

その際、各層は突き棒で一定の圧力で突き固める。このようにして詰められた試料を、鉛直圧力 $\sigma_{v0}=49$ kPa で24時間圧密する。

圧密後の供試体は、直径75 mm、高さ約20 mmの円板状であり、間隙比は1.30~1.35であった。

3. 実験装置および方法

本実験にはひずみ制御型動的単純せん断試験機を使用した。その機構の詳細についてはすでに述べてあるので、ここでは Fig. 2 にせん断箱の部分のみを示し、簡単に説明する。

せん断箱は Kjellman 型で、供試体はゴムスリーブで包まれ、その周りには内径75.2 mm、外径96.0 mm、厚さ2.0 mmのアクリルリングが15枚積み重ねられている。このため、供試体は、横方向の膨張は拘束されるが、せん断変形に対してはほぼ自由に挙動できるようになっている。

また、間隙水圧は、供試体の厚さが薄く、間隙水圧分布が鉛直方向にほぼ一様であると考えられることから、供試体下部と圧力変換器（受圧面直径=6.0 mm）を銅管で連結することにより測定している。

繰返しまたは静的せん断ひずみ発生装置としては、電機-油圧サーボシステムを用いた。このサーボシステムは、Fig. 2 のロードセルの左側に取り付けた油圧シリンダーを作動させるものである。

実験では、まず供試体を擬似過圧密状態にするために鉛直圧 σ_{v0} で予圧密後、所定の繰返しせん断ひずみを加え、その際に生じた間隙水圧を排水によって消散させた（この過程を先の論文⁶⁾で「排水を伴った繰返しせん断

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

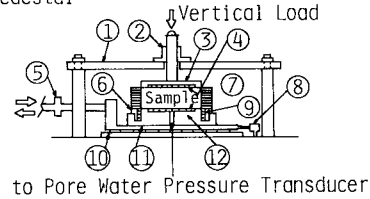


Fig. 2 Shear box of cyclic simple shear test apparatus.

試験」とよんでいる。今回は、繰返し回数 n_c は200回で一定とし、ひずみ振幅 γ_{avn} を0.3~3.0%の間で変化した。

一方、供試体を過圧密状態 (OCR=1~6) とする場合には、まず σ_{v0} で予圧密後、 σ_p まで荷重を増加し、再び σ_{v0} まで除荷した。ここでは、前述のように $\sigma_{v0}=49$ kPa とした。

このような2つの状態径路の異なった供試体に対して、非排水状態で静的単純せん断試験を行った。ひずみ速度は5%/minである。

また、擬似過圧密および過圧密の違いを e - $\log \sigma_v$ 曲線の形からみるために、ここでは荷重を σ_{v0} からいったん、 $\sigma_v=9.8$ kPa まで除荷した後、荷重増加率が1で段階載荷するという圧密試験も行った。

4. 実験結果および考察

Fig. 3 (a), (b) は、それぞれ「排水を伴った繰返しせん断」を行った場合と σ_{v0} - σ_p - σ_{v0} の径路での載荷、除荷を行った場合の供試体に生じた鉛直ひずみを示している。(b) 図では、鉛直ひずみはOCRの対数にほぼ比例している。これに対して (a) 図では、せん断ひずみ振幅の増大とともに、鉛直ひずみは大きくなるが、せん断ひずみ振幅が2%以上になると一定値に落ち着く傾向がみられる。このような、「排水を伴った繰返しせん断」によって生じる鉛直ひずみは間隙比の変化によるもので、これについては、すでに報告したように繰返しせん断中に生じる間隙水圧によって決まり、また発生する間隙水圧についても、繰返し回数とひずみ振幅 ($\gamma_{avn}=0.3\sim 1.5\%$ の範囲) の関数として表わされている⁶⁾。

Fig. 4 (a), (b) は、それぞれ擬似過圧密状態および過圧密状態にある供試体について、 $\sigma_v=9.8$ kPa まで除荷後、段階載荷することによって得られた e - $\log \sigma_v$ 曲線である。図中、 $\sigma_v=49$ kPa の線上の●印が予圧密後の状態、その他の○印が擬似過圧密あるいは過圧密の状態を示している。両図において、○印における間隙比

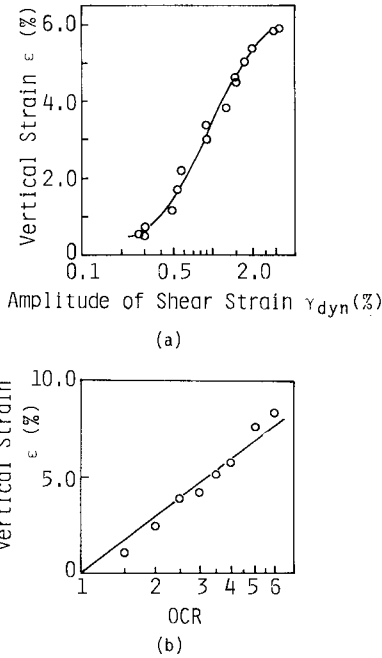


Fig.3 Relationships between ϵ and γ_{dyn} .

がほぼ等しくなっているが、これは実験値に対する間隙比の影響を除くために、擬似過圧密、過圧密状態の供試体を作製する際に両者の間隙比が等しくなるようにしたためである。今回の実験では、せん断ひずみ振幅が3.0%の場合はOCRが4.0の場合に対応し、0.30%ではOCRが1.5に対応するようになった。

(a)図の場合は(b)図に比較して除荷曲線の傾きは一般に小さく、特にせん断ひずみ振幅が3.0%の場合は供試体はほとんど膨張していないことになる。

これは、明確ではないが、大きいひずみ振幅によって土粒子の幾何的配列が破壊されることによって、供試体の回復ひずみが減少するという意味での弾性的性質を失ったためと考えられる。

また、先行圧密圧力を越えても正規圧密曲線(NCL)に一致せず、大きいせん断ひずみ振幅を受けた場合はその差が大きくなっている。これは、Schmertmann⁸⁾が示したように、攪乱を受けた試料の e - $\log \sigma_v$ 曲線の特性に類似している。

次に静的単純せん断強度の比較について述べる。

擬似過圧密と過圧密状態の供試体についての静的単純せん断試験を行い、せん断ひずみ $\gamma_{st}=15\%$ のときの強度 τ と正規圧密状態における τ_N との比を求め、せん断初期の間隙比との関係で示したものが、Fig.5である。ここに、 γ_{st} は静的単純せん断試験時のせん断ひずみである。間隙比が大きいとき($e \geq 1.3$)は強度比に明確な差はみられないが、 e が小さくなると明らかに過圧密

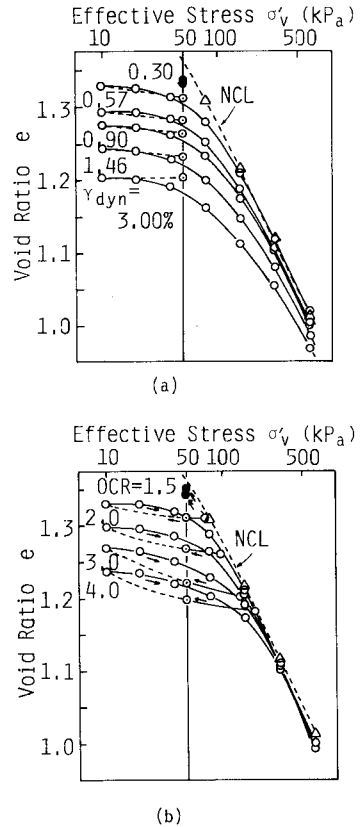


Fig.4 e - $\log \sigma_v$ curve.

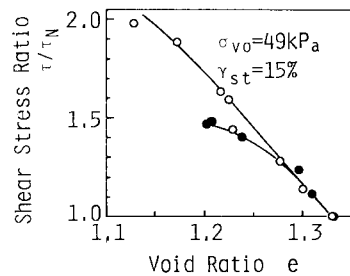
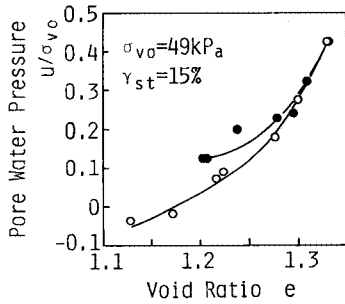
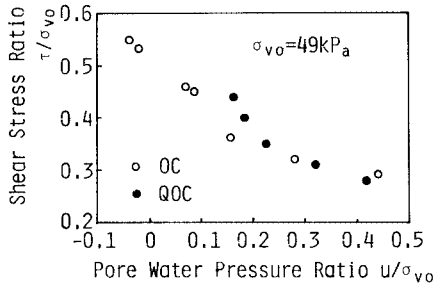


Fig.5 Comparison of τ / τ_N .

状態の供試体の強度の方が大きくなり、 $e=1.2$ では約1.2倍となっている。

したがって、擬似過圧密粘土と過圧密粘土の非排水強度を比較すると、正規圧密状態からの間隙比の変化が小さい場合には、両者の間にほとんど差がみられないが、大きいひずみ振幅が加わって、間隙比が著しく減少する場合には、明らかに過圧密状態の非排水強度より小さくなる。この原因については明確ではないが、Fig.4に示したように、繰返しせん断を受けた場合には、攪乱の影響を受けるためであると考えられる。

一方、Fig.6は静的せん断中に生じた間隙水圧比の比

Fig. 6 Comparison of u/σ_{v0} .Fig. 7 Relationships between τ/σ_{v0} and u/σ_{v0} .

較であるが、擬似過圧密状態ではダイレイタンスの発生が著しく小さくなっていることがわかる。

そこで、せん断中に発生する間隙水圧の影響を除いて検討を行うために、せん断ひずみ $\gamma_{st}=15\%$ におけるせん断強度比 τ/σ_{v0} と間隙水圧 u/σ_{v0} の関係を Fig. 7 に示した。●印が擬似過圧密(QOC)、○印が過圧密状態(OC)を示す。両者の間に明確な違いはみられない。このことは有効応力基準によるせん断強度に差がないことを意味しており、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. まとめ

動的単純せん断試験機を用いて、正規圧密状態の粘土に所定のひずみ振幅の繰返しせん断を加えた後、その際に生じた間隙水圧を消散させ圧密することによって生じた擬似過圧密粘土 (Fig. 1 で状態経路が N-Q-N' で N' 点の示す応力状態にある粘土) と過圧密粘土 (Fig. 1 で状態経路が N-C-N' で N' 点の示す応力状態にある粘

土) の強度特性および圧密挙動の相違を明らかにすることを目的として、それぞれの供試体について、圧密試験および静的単純せん断試験を行った。

その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 擬似過圧密粘土の e - $\log \sigma_o$ 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 (NCL) に一致しないこと、および大きいひずみ振幅を受けた粘土ほどその傾向が大きくなり、攪乱を受けた粘土の特長を示す。

(2) 擬似過圧密粘土の全応力規準による静的せん断強度は、繰返しせん断後の排水過程における間隙比の変化量が小さければ過圧密粘土のそれとほぼ一致する。しかし、間隙比の変化量が大きくなると、過圧密粘土の静的強度より小さくなる。一方、有効応力規準による静的せん断強度では、両者の違いはほとんどみられない。

本実験を手伝っていただいた、本学学生 浅井和博、日吉厚夫両君に謝意を表す。

参考文献

- 1) Matsui, T., Ohara, H. and Ito, T. : Cyclic stress-strain history and shear characteristics of clay, Proc. ASCE, Vol. 106, GT. 10, pp. 1101~1120, 1980.
- 2) Koutsoftas, D. C. : Effect of cyclic loads on undrained strength of two marine clays, Proc. ASCE, Vol. 104, GT. 5, pp. 609~620, 1978.
- 3) 佐々木康・谷口栄一・唐沢安秋：粘土の動的強度，土木技術資料，22巻，8号，1980.
- 4) 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.
- 5) 大原資生・山本哲朗・生田裕彦：繰返しせん断履歴を受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. 75~82，1981.
- 6) 大原資生・松田 博・近藤泰生：排水を伴った飽和粘土の繰返し単純せん断試験，土木学会論文報告集，第352号，pp. 149~158，1984.
- 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，第352号，pp. 179~186，1984.
- 8) Schmertmann, J. H. : The undisturbed consolidation behavior of clay, Trans. ASCE, Vol. 120, pp. 1201~1233, 1955.

(1985. 3. 25・受付)