

三軸試験機を用いて異方圧密・繰返し非排水せん断履歴を与えた軟弱粘性土の非排水せん断挙動

粘性土，異方圧密，繰返し三軸試験

名古屋大学大学院　〇市菌泰寿，Angelo Edora，中井健太郎，野田利弘

1. はじめに

近年，日本だけでなく世界各地で絶え間なく地震が発生しており，液状化や建物倒壊，沈下といった様々な被害がみられる．一般的に地震被害と言うと砂質土地盤の液状化被害が注目されているが，粘性土地盤であっても支持力低下に伴う構造物倒壊や地震中から地震後の沈下被害が観測されている．有名な粘性土地盤での地震被害としてメキシコ地震(1985)が挙げられる．メキシコシティはテスココ湖を埋めたた地盤上に立地しており，その土質は含水比 100～400%の高含水比軟弱粘性土で構成されていることが確認されている．粘性土地盤における地震被害はその他にも国内外で確認されているが，それらに共通するのは，いずれも高含水比で鋭敏な軟弱粘性土地盤ということである．粘性土の動的特徴を把握するために，これまでに多くの室内実験が行われてきている．しかし，試料採取の制約から自然堆積状態から乱さないように採取した不攪乱試料ではなく，実験室で予備圧密して作製した再構成試料を用いていることも多い．また，実地盤は鉛直応力と水平応力が異なる異方応力状態にあると考えられるが，等方応力状態で繰返し載荷試験を実施することも少なくはない．本報では岐阜県海津地区に厚く堆積している軟弱粘性土層から採取した不攪乱試料を用いて，異方応力状態での繰返し非排水三軸試験を実施し，初期応力比が繰返しせん断挙動に及ぼす影響を把握する．更に，異なる回数で繰返しせん断を止めて単調非排水せん断に移行し，繰返しせん断履歴の違いがその後の力学挙動に及ぼす影響を把握する．

2. 実験に用いた土試料

表-1 に実験に用いた粘性土の物理特性，図-1 に粒径加積曲線を示す．自然含水比は液性限界と近く，高含水比状態にある．また，細粒分含有率がほぼ 100%を占め，工学的分類では CH（粘土（高液性限界））に分類される．図-2 に標準圧密試験結果を示す．図中には不攪乱試料の実験結果に加えて，自然含水比を保ったままこね繰返して作製した練返し試料の実験結果も併記している．練返し試料の圧縮線は，載荷初期から直線となり，正規圧密線（NCL）を求めることができる．不攪乱試料は NCL の外側の不可能領域へ嵩張った応力状態を取り，載荷応力の増加とともに，NCL に次第に上側から漸近していく．このような不可能領域に応力状態を取る嵩張り（構造）の形成に加えて，高応力下での高い圧縮性は，軟弱な自然堆積粘土の圧縮特性としてよく知られている．

表-1　物性特性

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.69
液性限界 w_L (%)	73
塑性限界 w_p (%)	33
塑性指数 I_p	40
自然含水比 w_n (%)	78

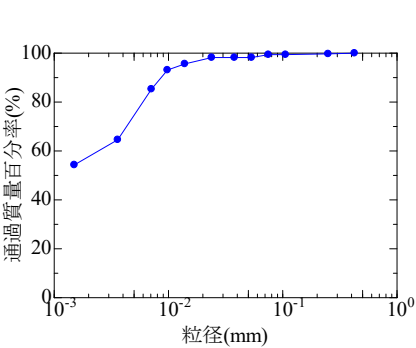


図-1　粒径加積曲線

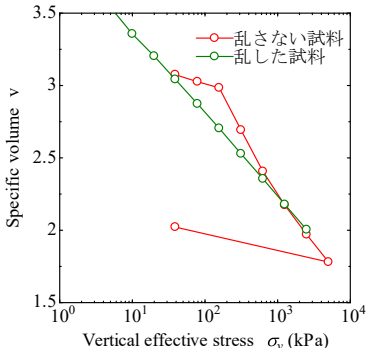
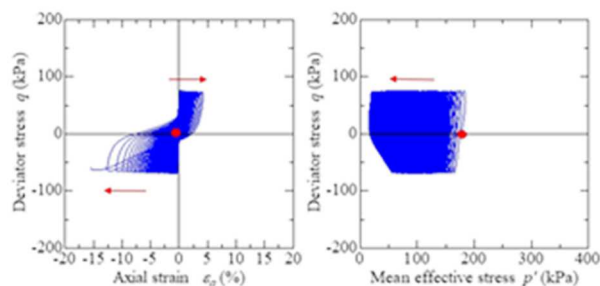


図-2　標準圧密試験結果

3.1　繰返し非排水せん断試験

はじめに，初期応力比の異なる非排水繰返しせん断試験結果について述べる．実験に用いた不攪乱試料の土被り圧は 180kPa 程度のため，鉛直応力を 180kPa に固定し，水平応力を 180kPa，144kPa，108kPa と変えることで， K_0 が 1.0，0.8，0.6 の異方応力状態を再現した．異方応力状態で 24 時間圧密した後，側圧一定条件のもと，応力振幅 72kPa，周期 20 秒で繰返し非排水せん断を与えた．図-3～図-5 に $K_0 = 1.0$ ，0.8，0.6 の場合の実験結果（応力ひずみ関係：軸差応力 q －軸ひずみ ε_a 関係，有効応力パス：軸差応力 q －平均有効応力 p' 関係）を示す．なお，載荷速度が速いため供試体内の過剰間隙水圧分布は不均質であることが想定されるが， p' に関しては，供試体下端で計測した過剰間隙水圧を代表値として算出している．破壊までの繰返し回数は K_0 が 1.0，0.8，0.6 においてそれぞれ 1295 回，955 回，134 回であり， K_0 が小さいほど，つまり異方応力状態にあるほど，破壊に至るまでの繰返し回数が少なく，繰返し非排水せん断抵抗が小さい．有効応力パスに着目すると，粘性土であっても繰返し載荷によって p' は低下，徐々に剛性を失っていることがわかる． K_0 が 1.0，0.8，0.6 それぞれにおいて破壊する時の p' はそれぞれ 20kPa，30kPa，50kPa であった．また，応力ひずみ関係からは $K_0 = 1.0$ の場合，圧縮側，伸張側の両側に ε_a が進展して最終的には伸張側で破壊しているのに対して， $K_0 = 0.8$ ，0.6 の

図-3 $K_0 = 1.0$ での非排水繰返しせん断試験結果

場合、 ε_a は圧縮側に進展し、そのまま圧縮側で破壊する。 $K_0 = 1.0$ において伸長側で ε_a 進展が卓越するのは、自然堆積時に異方性が圧縮側に発達していたためである。一方、 $K_0 = 0.8, 0.6$ の場合は、鉛直応力の方が水平応力よりも大きい異方応力状態で繰返し载荷を与えたため、圧縮側で ε_a 進展が卓越した。以上の実験結果から、等方応力下だと繰返しせん断抵抗を過大評価してしまう危険性がある。

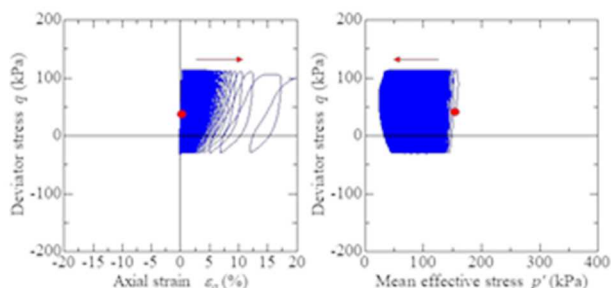
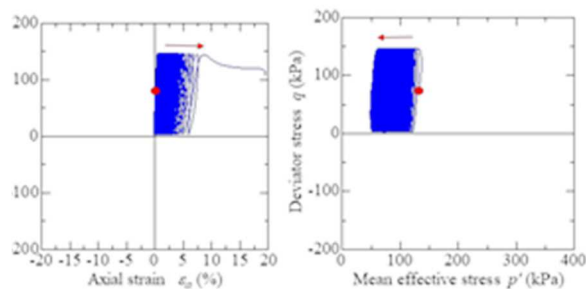
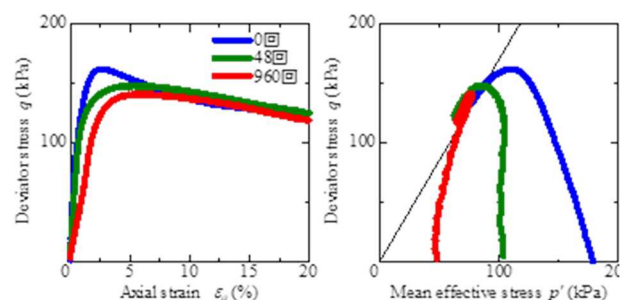
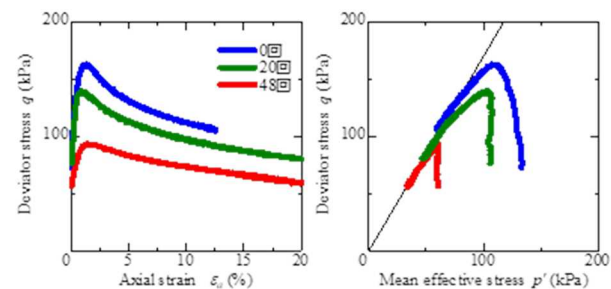
3.2 繰返し非排水せん断履歴を受けた供試体のその後の単調非排水せん断挙動

続いて、繰返しせん断がその後のせん断特性におよぼす影響を把握するために、繰返し非排水せん断を任意の回数で止め、そのまま、側圧一定非排水単調せん断試験を実施した。载荷速度は $0.1\%/min$ である。なお、繰返しせん断終了後は供試体内の間隙水のマイグレーションが十分に生じるように10分ほど時間をおいてから単調せん断した。図-6に $K_0 = 1.0$ の場合、図-7に $K_0 = 0.6$ の場合の実験結果を示す。青色は非排水繰返し载荷履歴がない場合であるが、 $K_0 = 1.0$ の場合も 0.6 の場合も、軟弱自然堆積粘土に特徴的なひずみ軟化挙動を示している。また、 $K_0 = 1.0$ の場合も 0.6 の場合も、繰返し回数が多く、 p' が減少するほど、非排水せん断強度 (q のピーク) が低下する。 K_0 が小さく異方応力状態にあるほど、繰返し载荷中の p' の減少もその後の非排水せん断強度の低下も顕著に生じる。この非排水せん断強度の低下は、繰返しに伴う乱れが原因である。つまり、等方応力状態に比べて、初期せん断を受けている異方応力状態では、粘性土の乱れが生じやすいことを意味する。ここでは省略するが、繰返し試料／再構成試料の場合も、繰返し非排水せん断によって p' が減少するものの、不攪乱試料のように非排水せん断強度の低下は見られない。

4. おわりに

本報では、軟弱粘性土不攪乱試料を用いて、異方応力状態下での繰返し非排水三軸試験および繰返し载荷後の単調非排水せん断試験を実施した。繰返し非排水せん断挙動から、 K_0 が小さいほど破壊までの繰返し回数は少なく、繰返し非排水せん断抵抗は小さくなることがわかった。これより、等方応力状態で繰返しせん断をすると繰返しせん断抵抗を過大評価してしまう恐れがある。また、繰返し後の単調非排水せん断挙動から、事前の非排水繰返しせん断によって粘土試料が乱され、繰返し後の非排水せん断強度が低下することが分かった。非排水せん断強度の低下(粘土試料の乱れ)は、繰返し回数が多いほど、また、異方応力状態にあるほど顕著となる。砂質土に比べると粘性土地盤は地震に対して安定だと考えられてきた。しかし、これら実験結果は、高含水比かつ鋭敏な軟弱粘性土地盤においては、初期せん断を受ける異方応力状態にあり、長時間継続地震動を受ける場合は、地盤が乱されて地震被害が発生しうることを示唆している。

謝辞： 実験に用いた不攪乱試料は中日本高速道路㈱から提供いただいた。ここに深く感謝の意を表す。

図-4 $K_0 = 0.8$ での非排水繰返しせん断試験結果図-5 $K_0 = 0.6$ での非排水繰返しせん断試験結果図-6 $K_0 = 1.0$ での非排水繰返しせん断試験後の単調非排水せん断試験結果図-7 $K_0 = 0.6$ での非排水繰返しせん断試験後の単調非排水せん断試験結果