

1. はじめに

不飽和土の研究では試験時間短縮の目的で透水性のよい試料が選択的に用いられることが多く、不飽和粘性土の圧密特性に関する実験的研究が少ない。本研究の目的は不飽和粘性土の一次元圧密・圧縮に関する基本的な挙動を実験的に明らかにすることである。繰り返し・再圧密した飽和粘性土を一次元圧密容器内でサクシオンを作用させて不飽和状態にして、段階的に载荷・除荷した。併行して実施した飽和状態での試験の結果と比較して不飽和状態での圧密・圧縮挙動について考察する。

2. 試料

粉末粘性土（藤森粘土）の $75\ \mu\text{m}$ ふるい通過分を用いた（表 1）。液性限界の約 2 倍の含水比で繰り返し、大型圧密容器で最大圧密圧力 73kPa で予備圧密した。予備圧密後、直径 6.0cm 、高さ 2.0cm に整形して 1 次元圧密試験に供した。整形直後では飽和度はほぼ 100% である。

表 1. 試料の物理的性質

土粒子密度 (g/cm^3)		2.683
粒度	シルト分 (%)	55
	粘土分 (%)	45
コンシステンシー	液性限界 (%)	57
	塑性限界 (%)	31
	塑性指数 (%)	26

3. 試験装置

不飽和および飽和状態で 1 次元圧縮試験を行った。供試体の不飽和化および不飽和状態での圧密には不飽和土用圧密試験装置（図 1）を、飽和状態での圧密には通常の 1 次元圧密試験装置をそれぞれ使用した。

不飽和土用圧密装置の概要を述べる。圧密容器が圧力セル内に設置されている。圧密容器底部にセラミック板が取り付けられており、サクシオンの測定と制御が可能である。本研究では $\text{AEV}=300\text{kPa}$ （メー

カー測定値）のセラミック板を使用した。セラミック板は外部の二重管ビュレットに通じており、ビュレット内水面に作用させた空気圧 (u_w') がセラミック板を通して供試体底面に間隙水圧 (u_w) として作用する。加圧版には細孔が開けられていてセル圧が間隙空気圧 (u_a) として作用する。以後、サクシオンは底面間隙水圧と間隙空気圧の差を意味する。

サクシオンを変化させると供試体底面から吸水または排水する。一方、圧密荷重を変化させたとき、吸水は底面から起こるが排水は供試体上面および底面から起こりうる。底面からの排水量は二重管ビュレット内の水位変化から測定するが、上面からの排水量は測定できない。

蒸発を抑制するため供試体上面にはメンブレンフィルターを、载荷棒には Y リングをそれぞれ装着している。

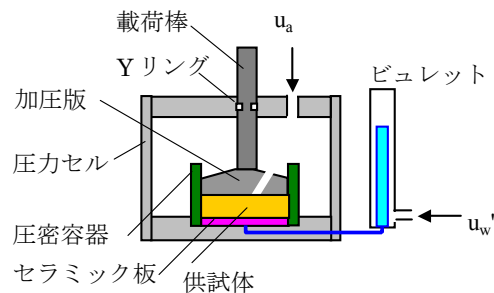


図 1. 不飽和土用一次元圧密装置模式図

4. 試験方法

不飽和状態での圧縮試験の方法を述べる。

サクシオンを作用させて不飽和にしてから圧密荷重を载荷した。不飽和化時にサクシオン 120kPa を作用させた試験 (s120 試験) と 240kPa を作用させた試験 (s240 試験) を行った。作用させたサクシオンと圧密圧力の径路を図 2 に示す。荷重を作用させない（ただし加圧板と载荷棒の自重は作用している）状態で所定のサクシオンを段階的に作用させて不飽和状態にした。次に、サクシオンを所定の大きさに保って、圧密圧力 (p) を段階的に増加・減少させた。

s120 試験では、最大の圧密圧力 (1256kPa) の段

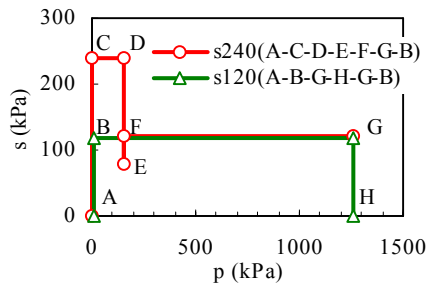


図 2. 作用応力経路

階で飽和度が 100%に達した. そのとき, 一旦, サクションを 0 に戻して透水試験を行った. 次に, 再度サクションを 120kPa に上げてから除荷した.

s240 試験では, $s=240$, $p=157$ (kPa) の段階 (試験開始後約 45 日) でセラミック板へ空気が浸入した. そこで, サクションを 240 から 80 を経て 120 に下げた. その後, $s=120$ kPa で試験を続行した. なお, セラミック板の AEV 値は, 通常, 比較的短時間で測定されるので, 本研究のように試験が長期にわたると AEV 値より低いサクションでも空気が浸入する可能性がある.

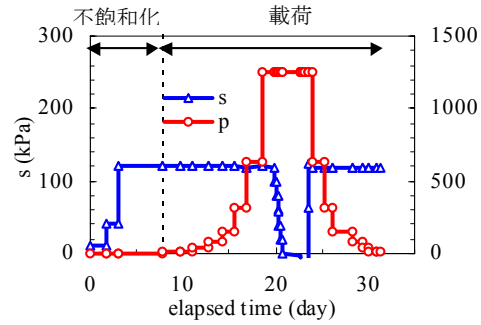
5. 結果と考察

5.1 間隙比と飽和度の変化

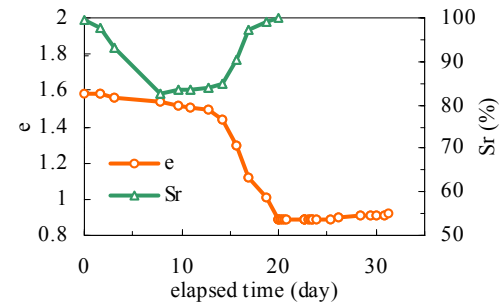
s120 試験を例にとって, サクションと圧密圧力の変化に対応する間隙比と飽和度の変化挙動の一般的挙動をみる. 図 3(a)にサクション s と圧密圧力 p の時刻歴を, 同図(b)に対応する間隙比と飽和度の時間的変化を示す. 飽和度が 100%に達すると供試体上面から排水が起こり, それ以降の汲・排水量, したがって飽和度は正確に算定できないので, 図 2 (b)にはその部分の飽和度を示していない.

サクション作用によって飽和度も間隙比も減少するが, 飽和度の減少が卓越する. 圧密荷重を増加すると飽和度は上昇し間隙比は減少する. 圧密降伏応力より低い荷重段階ではそれらの変化は小さく, それより高い荷重で変化が大きくなる. (圧密降伏応力については後述).

サクションが作用していても圧密圧力の増加によって飽和度が上昇してことに注目したい. この試験では飽和度が 100%に達した. この現象はサクションと飽和度の関係 (水分保持特性) が唯一でないことを表す. このことは広く認識されているが, 荷重によって大きく圧縮する場合に特に顕著になるようである.



(a) サクションと圧密圧力の時刻歴



(b) 間隙比と飽和度の時刻歴

図 3. 応力と状態量の時間的変化 (s120 試験)

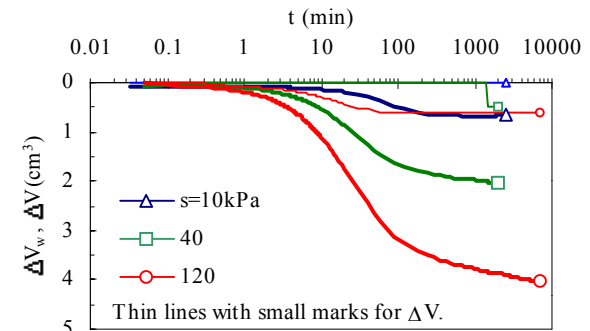


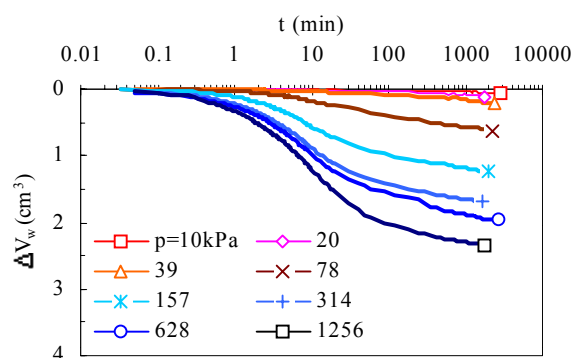
図 4. 不飽和化時の挙動

5.2 不飽和化時の圧密挙動

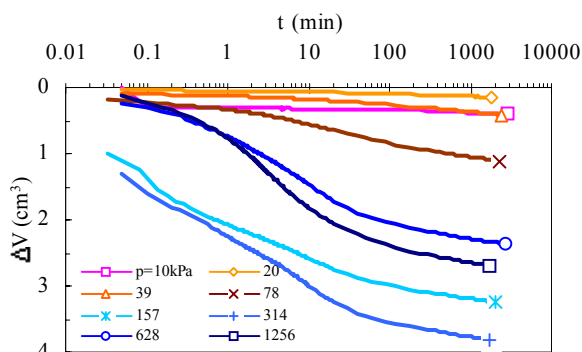
図 4 に不飽和化時の間隙水排水量 ΔV_w と体積減少量 ΔV の時間的変化を示す. どのサクションレベルにおいても体積減少量より排水量が卓越し, 不飽和化が進んでいることがわかる. 体積減少量は, サクション 120kPa の段階で顕著な時間依存的な挙動を示したが低いサクションレベルではほとんど生じないかまたは突発的である.

5.3 載荷時の圧密挙動

s120 試験の結果を示す. 図 5 に各荷重段階における排水量 ΔV_w と体積圧縮量 ΔV の時間的変化を示す. 排水量-時間関係は典型的な飽和土の圧密挙



(a) 排水量の時間的変化



(b) 体積減少量の時間的変化

図 5. 載荷時の圧密挙動

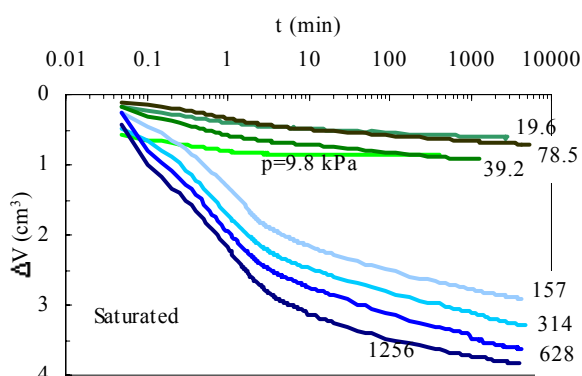


図 6. 飽和状態での圧密挙動

動になっている。一方、体積変化は荷重レベルによって挙動が異なる。この試料では $p=157$ および 314kPa で瞬時的圧縮が起こった。先に図 3 で指摘した、間隙比が急増した荷重レベルに相当する。間隙空気が瞬時に排出されたためであると思われる。

図 6 は飽和状態での圧密試験の結果である。正規圧密の段階に入っても図 5 で見られたような瞬時的な圧縮が起こっていない。なお、一次圧密の終了は不飽和の試験より早い。これはセラミック板を使用していないためである。

載荷による排水挙動とサクシオン上昇による排水挙動を比較する (図 7)。

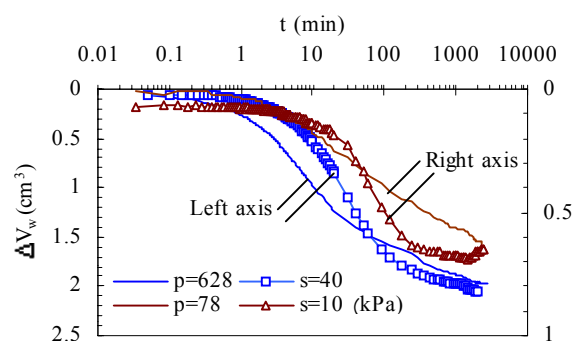


図 7. 載荷および不飽和化による排水挙動の比較

$p=628\text{kPa}$ 載荷時に生じた排水量と不飽和化時に $s=40\text{kPa}$ を作用させたときの排水量がほぼ等しい。同様に、 $p=78\text{kPa}$ 載荷時と $s=10\text{kPa}$ 作用時に同量の排水量が生じた。どちらのケースでも載荷時に、排水が顕著に生じ始める時間が早い。載荷時の方が間隙比が小さいことを考慮すると、体積圧縮が強制的に排水を助長したといえる。また、載荷時には、二次圧縮的な体積変化の影響を受けて排水が収束し難いという傾向が見られる。

5.4 圧縮特性に対するサクシオンの影響

図 8 にすべての試験の間隙比と圧密圧力の関係を示した。

$s120$ および $s240$ 試験の圧縮曲線が飽和状態の曲線から大きく右側に位置しており、サクシオンを作用させると圧密降伏応力が大きくなることを表している。

圧縮性は、圧密圧力が圧密降伏応力より低いとき極めて小さいこと、圧密降伏応力より高くなると圧縮性が急増するがさらに圧密圧力が高くなると圧縮性が減少することがわかる。なお、サクシオンが作用した状態で除荷するとほとんど膨潤しない。

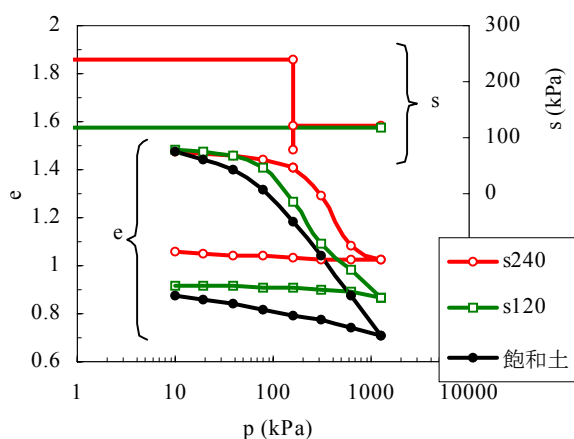


図 8. 間隙比と圧密圧力の関係

6. 結論

練り返し・圧密した飽和粘性土をサクシオンを作
用させて不飽和にした供試体に対して 1 次元圧密試
験を実施した．排水および体積変化の時間挙動（圧
密挙動）と圧縮性に対するサクシオンの影響につい
て基本的な現象を明らかにした．

- (1) 不飽和にすると圧密降伏応力が大きくなる．
- (2) 圧密圧力が圧密降伏応力を超えると圧縮指数が
一旦大きくなるがさらに圧力が増えると圧縮指数が
低下した．
- (3) 圧密降伏応力以上の載荷段階で瞬時的な圧縮が

起こった．

- (4) 荷重載荷による排水挙動は、荷重載荷による体
積圧縮の影響を受けて強制的に排水が促進されると
いう現象が見られた．

本研究では飽和状態の圧密試験を通常の飽和土用
装置を用いて行った．排水速度などを比較するため
には不飽和供試体を試験したのと同じ装置で行う必
要がある．今後の課題である．