

再飽和された飽和土のせん断特性

足利工業大学 正会員 西村友良
矢作建設工業株式会社 正会員 渡辺義規
長岡工業高等専門学校 正会員 小川正二

1. まえがき

土が飽和状態から不飽和状態へ移ることは、間隙中に空気が入り込み、間隙空気と間隙水の境界には表面張力が働き、土粒子間には表面張力を起因とするサクシオン力が生じる。飽和状態は土粒子と間隙水の2相であるが、不飽和状態は間隙空気が加わり3相となる。さらに間隙水と間隙空気の境界面を収縮性の膜として不飽和土は4相で構成されているものといわれている¹⁾。不飽和土に存在するサクシオン力は土粒子間に働く粘着力であり、この粘着力の発生が土粒子間の結合力を高め、せん断抵抗力を増加させる。

一方、自然斜面や盛り土などの不飽和状態で存在している土が降雨などによって土中の含水量が増大し、飽和状態に近づくにつれ、土のせん断強さは低下するものと考えられる。土のせん断強さの低下の原因はサクシオン力の消失に伴う土粒子間力の減少である。このように飽和状態から不飽和状態、不飽和状態から再び飽和状態への履歴を受けた土のせん断挙動はあまり知られていない。そこで本研究では、飽和粘性土を三軸室内で不飽和化する過程で加圧板法²⁾によってサクシオン力を載荷し、土中に間隙空気を透かし、所定の飽和度に至るまで脱水(乾燥)を行い、不飽和化した粘性土のせん断特性を明白にした。不飽和化した土をさらに、再飽和させることを試み、再飽和された粘性土のせん断特性の変化を不飽和化過程、再飽和過程で生じた体積変化を考慮して考察を行い、再飽和された飽和土のせん断特性は、不飽和化過程および再飽和過程における体積収縮が見かけ上、過圧密履歴の影響を示し、再飽和された飽和土の破壊線は飽和粘性土と同じ破壊線であることを明かにしている。

2. 試料・実験方法

2.1 試料

実験に用いた試料は新潟県柏崎市米山付近より採取した米山粘性土で、物理的性質をTable-1に、粒径加積曲線をFig-1に示す。米山粘性土は砂分を15%含むため、比較的透水性が良く、飽和供試体を脱水させ不飽和化するには適した試料であると考えられる。

2.2 飽和供試体の実験方法

飽和供試体は、供試体の均一性を満たすために大型圧密槽内で試料土と脱気水を十分に混合攪拌し0.7kgf/cm²の圧密圧力で、予備圧密を行った後直径50mm、高さ125mmの供試体に成形している。飽和供試体の初期間隙比は1.20、初期含水比は41.0%である。飽和粘性土の三軸圧縮試験は以下のような方法で行った。供試体の有効拘束圧力を0.2kgf/cm²に保ちながらバックプレッシャー $\sigma_{B, P} = 1.0\text{kgf/cm}^2$ を供給した。等方圧密終了時間は3 t 法により判断し120分と定め、圧密終了後にB値を測定し、せん断過程に入った。

2.3 不飽和化作用を受ける供試体の実験方法

通常、不飽和供試体はモールドに所定の含水比に調整した試料を入れ、モールド内で試料を静的あるいは動的に締固めて作成する。しかし、加湿による試料の団粒化や層と層の継ぎ目の存在などによって構造的に等方である供試体の作成は容易でない。一方、加圧板法²⁾を利用した方法としてスラリー試料からサクシオンによって脱水し均一な不飽和供試体を作成する方法がある。まさしく、この方法は飽和

Shear properties of resaturated soils.

Tomoyoshi NISHIMURA. Ashikaga Institute of Technology. Yoshinori WATANABE.

Yahagi Corporation. Shoji OGAWA. Nagaoka National College of Technology.

Table-1 Soil properties

Soil particle density	2.815
Liquid limit	57.80%
Plastic limit	43.80%
Plastic index	14.00%
Clay	15.00%
Silt	40.60%
Sand	44.40%

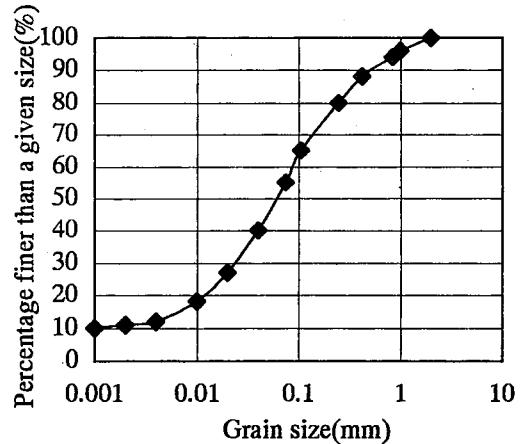


Fig-1 Grain size distribution curve

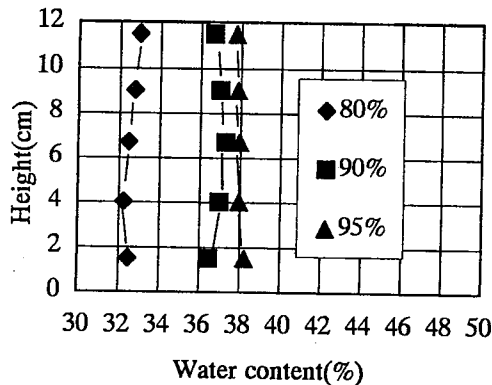


Fig-2 Distribution of water content

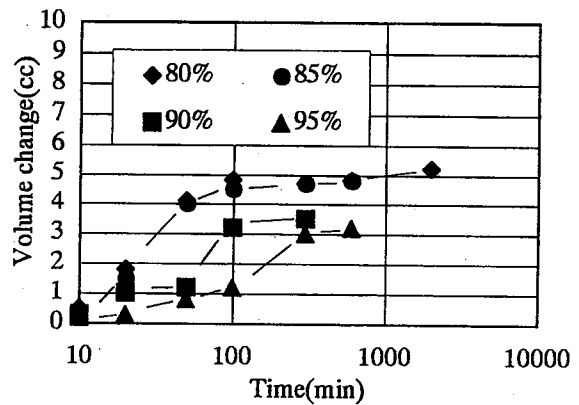


Fig-3 Volume change with elapsed time

状態の土を不飽和化していることになる。この方法は、三軸圧縮室内のシンウオールパイプ中のスラリー試料に上部から空気圧力を供給し、土中に空気が侵入すると同時に余分な土中水が脱水（排水）され、不飽和化した土中には与えた空気圧力と等しい大きさのサクシオンが有することになる。本実験ではスラリー状態からでなく、『2.2 飽和供試体の実験方法』で述べた飽和供試体を不飽和化している。

不飽和化時の供試体の試験条件は、飽和度95%、90%、85%、80%とした。供試体の飽和度を100%から80%にまで低下させるには、 0.5kgf/cm^2 から 2.0kgf/cm^2 までの大きさのサクシオン力を飽和供試体に載荷し、脱水をおこなった。脱水中は空気圧とセル圧を連動させて空気圧を $0.1\text{kgf/cm}^2/\text{min}$ の割合で載荷し、所定の空気圧まで増大した。脱水量と体積変化量を測定しているため供試体が所定の飽和度まで低下したら脱水を終了した。脱水終了後、拘束圧力 ($\sigma_3 - U_a$) 一定条件で排気非排水状態の三軸圧縮試験を行った。

2.4 再飽和履歴を受けた供試体の実験方法

『2.3 不飽和化作用を受ける供試体の実験方法』で述べた方法で所定の飽和度まで不飽和化させた供試体にたいして通水し、再び飽和化させる。飽和度95%、90%まで不飽和化した供試体は脱水時にポーラスストーン付のペディスタルを用いて脱水を行ったので再飽和時には供試体下部よりバックプレッシャーを付加して通水した。一方、飽和度85%、80%にまで脱水した不飽和供試体は、脱水時にセラミックディスク付ペディスタルを使用したため、再飽和時には三軸室を分解してフィルターをセラミックディスクからポーラスストーンに変更した。いずれの供試体においても通水過程では供試体に 1.0kgf/cm^2 のバックプレッシャーを与えて通水させ、随時間隙圧係数B値の判定を行い、B値が上がらなくなっ

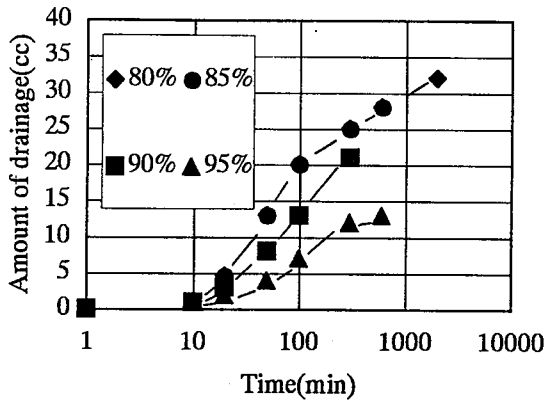


Fig-4 Drainage with elapsed time

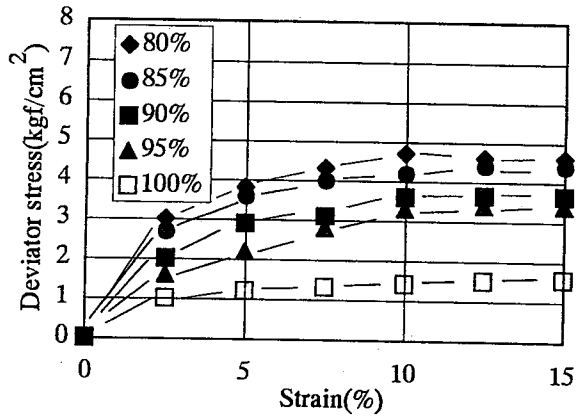


Fig-5 Relation between stress and strain

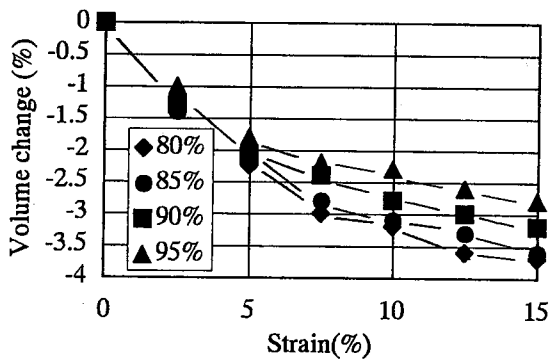


Fig-6 Relation between strain and volume change

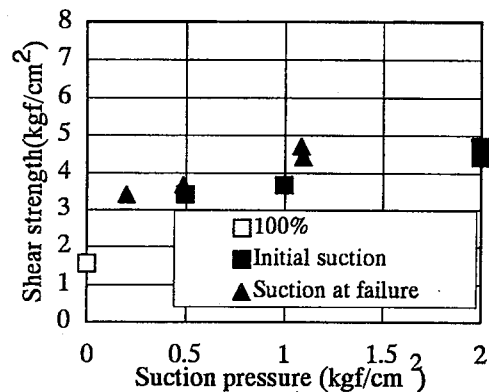


Fig-7 Relation between suction pressure and shear strength

たところで通水を終了させ、再飽和履歴の終了とした。再飽和終了後、さらに供試体にバックプレッシャーを 3.0kgf/cm^2 与え、間隙圧係数B値が0.95以上の値が得られたらせん断試験を行った。

3. 不飽和化作用を受けた土のせん断特性

不飽和化時には飽和粘性土中の間隙水を所定の空気圧力によって脱水させているが、不飽和化時の供試体中の含水比の分布を知ることは重要である。Fig-2は脱水後の供試体の含水比分布を供試体の高さごとに測定した結果を示している。含水比の分布のばらつきが1%以内で、ほぼ均一の状態に脱水され、飽和度が下がるにつれて含水比は減少している。不飽和化されると供試体は体積変化をFig-3のように生じる。目標飽和度の大きさにかかわらず、体積の経時変化は200分程度で一定となっている。しかし、脱水量の経時変化はFig-4のように200分を過ぎても脱水が進行しており、終了していない。したがって、供試体の体積変化量と脱水量を考慮して供試体の飽和度が所定の大きさに達した後、非排水条件でせん断試験をおこなった。所定の飽和度にしたして脱水量の経時変化に違いが見られるのは、不飽和土中の間隙水の分布の状態が、自由水が間隙全体に分布している封入不飽和から、封入間隙空気存在する一様不飽和状態に変化するためであり³⁾また、脱水時に載荷しているサクシヨン力の大きさによる違いであると考えられる。

不飽和化された供試体のせん断過程における応力-ひずみおよび体積変化の関係はFig-5, Fig-6に示す通りである。飽和土は明確な最大せん断応力を示さないが飽和度80%の場合には最大軸差応力がはっきりと示されている。また飽和度が低くなるにつれて、軸差応力、体積ひずみは大きくなっている。不飽和化した土中にはサクシヨン力が生じており、サクシヨン力が土の力学的挙動に複雑な影響を及ぼすこ

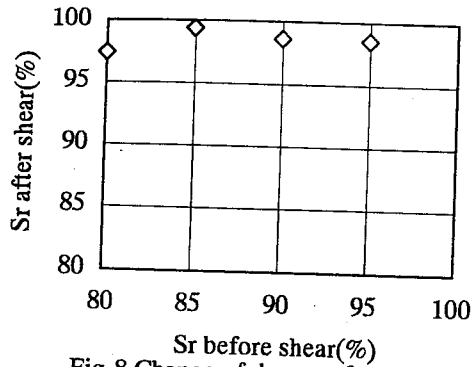


Fig-8 Change of degree of saturation

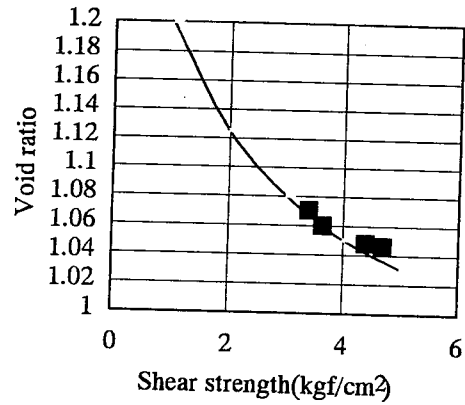


Fig-9 Critical state

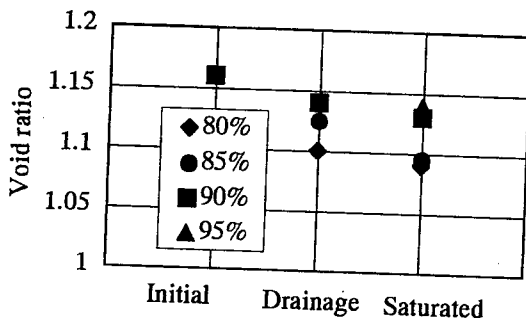


Fig-10 Change of void ratio

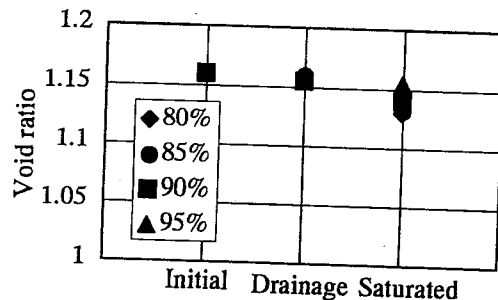


Fig-11 Change of void ratio

とは知られている。最大軸差応力とせん断前及びせん断後のサクシヨン力との関係をFig-7に示すと、サクシヨン力が大きいほど最大軸差応力は大きい。一方、不飽和化作用を受けた供試体の飽和度が80%以上であるから、せん断時の変形に伴い土中に過剰間隙水圧が発生し、せん断前に比べて、サクシヨン力が低下している。不飽和土のせん断後の飽和度を見るとFig-8にしめすようにほぼ飽和度100%に近づいている。一般的に不飽和土は飽和土より大きな強度が得られるが、本研究では飽和土の軸差応力に比べて2倍から3倍の強度が示された。Burland⁴⁾は、飽和土と不飽和土はともに非排水せん断強さと破壊時の間隙比にはユニークな関係があると述べており、本研究での最大軸差応力を示す状態での間隙比と最大軸差応力の関係はFig-9のように飽和土の限界状態線とほとんど差異がないことがわかる。

4. 再飽和履歴を受けた土のせん断特性

飽和状態にあった土を不飽和化し、再び飽和状態にした試験では、拘束圧力を一定にした場合と供試体の体積を変化させないように拘束圧力を変化させた場合の2通りの試験を行った。前者を拘束圧力一定試験、後者を拘束圧力変化試験と呼ぶ。

供試体は脱水時、通水時において体積変化を生じるので供試体の脱水前、脱水後、通水後における間隙比の変化をみるとFig-10 (拘束圧力一定試験)、Fig-11 (拘束圧力変化試験)のように飽和度が低くなるにつれて、通水後の間隙比は減少する。拘束圧力一定試験による体積収縮よりも拘束圧力変化試験の通水後の体積収縮が小さい。また、通水過程においては拘束圧力一定試験および拘束圧力変化試験のいずれの場合においても間隙比が減少しており、浸水にともない体積減少が生じた理由としては、通水過程においてコラプス現象⁵⁾が生じたと考えられる。

再飽和履歴を受けた土の応力-ひずみおよび関係はFig-12 (拘束圧力一定試験)、Fig-13 (拘束圧力変化試験)のようになり、土が一度、不飽和履歴を受けることにより、不飽和化作用を受ける前の飽和状態における軸差応力より大きな軸差応力が発揮されている。軸差応力の増加割合は脱水時の飽和度が低い

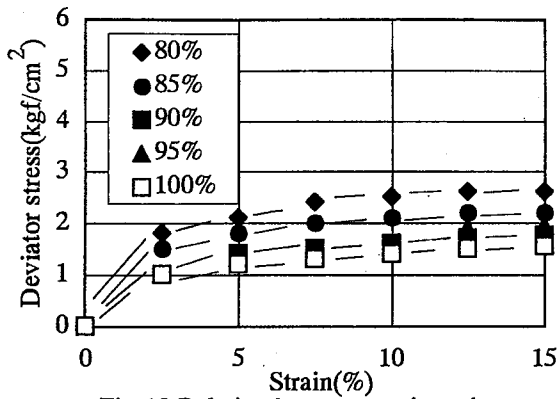


Fig-12 Relation between strain and stress

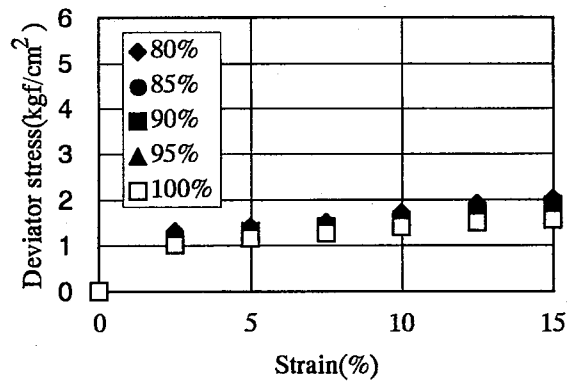


Fig-13 Relation between strain and stress

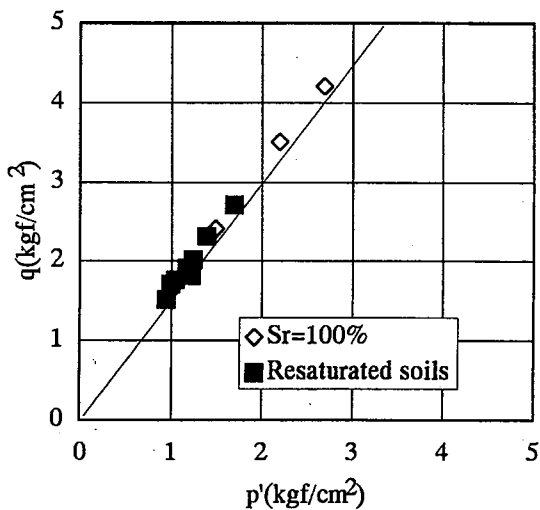


Fig-14 Relation between p' and q

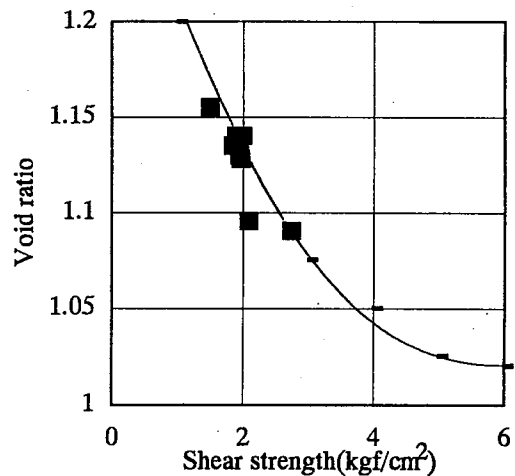


Fig-15 Critical state

ほど大きい。このような軸差応力の増大は過圧密履歴を受けた粘性土の挙動に類似しているため不飽和履歴は過圧密履歴を受けたのと同じ効果があると考えられる。拘束圧力を変化させた場合に、拘束圧力一定の場合のせん断強さに比べて小さくなるのは、体積収縮が生じないように拘束圧力を変化させたために小さくなったと考えられる。尚、飽和粘性土との強度を比較すると拘束圧力一定試験で、1.3倍から1.8倍、拘束圧力変化試験で1.0倍から1.2倍に強度増加が見られる。

破壊時における平均有効主応力と主応力差の関係はFig-14となり、再飽和履歴を受けた粘性土も飽和粘性土の限界状態線 CSL 上にある。この破壊線は $q=1.58p$ として表わされ原点を通り、土が不飽和作用および再飽和の履歴を受けても有効応力表示にすれば飽和土の破壊線と変わらないことになる。

Fig-9では飽和土、不飽和土に関わらず、Roscoeらの限界状態理論にあてはめて考えられることが出来ると述べた。再飽和土の限界状態について考えると、再飽和される段階で、体積収縮を起こすので非排水せん断強さは飽和正規圧密土に比べて大きくなるが、Fig-15に示されるように一つの破壊線上に描かれている。

5. 結論

本研究では、飽和粘性土に三軸室内でサクシオン力を载荷し不飽和化を行い、不飽和化した粘性土のせん断強さについて検討を行った。また、不飽和化した土をさらに再飽和し、再飽和履歴を与えた飽和土のせん断特性について明かにした。本研究で得られた結論を以下に要約する。

(1) 不飽和化時の粘性土のせん断強さは、脱水およびせん断時の体積収縮による見かけ上の過圧密履歴と、不飽和土の土粒子間に働くサクシヨン力の両方の影響によって、飽和粘性土より大きなせん断強さを発揮した。

(2) 再飽和した土のせん断特性は、土が再飽和されるとサクシヨン力が失われるために、不飽和化時の粘性土よりもせん断強さが低下する。しかし、脱水、通水時における供試体内の体積収縮による見かけ上の過圧密履歴の影響を受けるため、飽和粘性土よりもせん断強さが増大する。

(3) 再飽和した土の破壊時の強度定数は有効応力表示すると飽和粘性土と同じ破壊線上にプロットされ、土を再飽和化しても飽和土と同一の強度定数を示す。

参考文献

- 1) Fredlund, D.G.: Second Canadian Geotechnical Colloquium, Appropriate concepts and technology for unsaturated soils, Can. Geotech. J., 16, 121-139, 1979.
- 2) 土質工学会：不飽和土の工学的測定に関する信州セミナーテキスト，71-25，1989.
- 3) 渡辺康夫：粘性土のせん断特性荷与える空気圧の影響に関する研究，長岡技術科学大学修士論文，1992.
- 4) Burland, J.B.: Correspondence, Geotechnique, Vol. 14, 64-68, 1964.
- 5) Jennings, J.E. and J.B. Burland: Limitations to the use of effective stresses in partially saturated soils, Geotechnique, 12, pp. 125-144, 1962.