

火山性軽石土不攪乱試料のサクシオンとそのせん断強度に対する影響

Suction and its Effects on Shear Strength of Undisturbed Samples of a Volcanic Pumiceous Soil

清水正喜 Masayoshi SHIMIZU (鳥取大学工学部)

山本大輔 Daisuke YAMAMOTO (鳥取大学大学院院生)

大山倉吉軽石の不攪乱試料に対して一面せん断試験を行い、せん断強さに与える要因として、物理的条件である間隙比や含水比と力学的条件である供試体のサクシオンを取り上げて、それらの影響を調べた。せん断試験に先だってサクシオン測定可能な圧密試験装置で圧密試験を実施して圧密時のサクシオンの挙動を調べた。次いで供試体を一面せん断試験機に移し替えてせん断試験を実施した。その結果、供試体のサクシオンは圧密荷重の増加とともに減少し、用いた試料では圧密降伏応力 p_c より高い圧密荷重を載荷するとサクシオンが消滅すること、人工的な過圧密履歴を与えないで p_c より低い垂直応力でせん断したときのせん断強さは、間隙比や含水比より、サクシオンと最も高い相関性がみられるなどの結論を得た。

キーワード：火山灰質土、大山倉吉軽石、圧密、せん断強さ、サクシオン (IGC: C06, D02, D05, D06)

1. 序論

飽和していて、均質で、有効応力履歴が明らかまたは推定可能な土の力学挙動は、せん断強度特性も含め、かなり解明され、複雑な初期・境界条件の下でも数値解析が可能な構成モデルが多く提案されるに至った。一方、不飽和であり、不均質な、応力履歴が不明または推定困難な土は現実に多いのが事実である。このような土の力学挙動は十分に解明されたとは言いがたい。火山性土は後者の部類に属する。

わが国で火山灰質粘性土として総称されている土の多くは火山性降下または流下堆積軽石が長年月にわたり風化したものである¹⁾。軽石が風化してできた土は高間隙で高含水状態で存在し、一般に極めて鋭敏である。また、不攪乱状態では不均質性ゆえに強度もばらつく。

中国地方には大山起源の火山性土が厚く堆積している。本研究ではそのひとつである大山倉吉軽石層 (DKP) から採取した不攪乱試料を対象とする。この土は、後で実例を示すように、極めて鋭敏である。高い鋭敏性ゆえにトラフィカビリティーが極めて悪く、土工事において問題を引き起こす。

著者ら²⁾⁻⁴⁾はこれまでに間隙比や含水比などの物理的条件に着目して強度のばらつきを説明することを試みてきた。Lo⁵⁾は鋭敏なメキシコ市粘土 (火山灰質粘性土) に Hvorslev の強度理論⁶⁾を適用し有効内部摩擦角がゼロであると結論したが、著者らの結果によれば DKP には Hvorslev の理論が適用できないようである⁴⁾。すなわち、飽和土に対して定義された有効応力の概念のみを適用するだけでは強度特性を説明するのに不十分である。

本研究の目的は、不攪乱試料が不飽和であることに注

目し、物理的条件以外に力学的条件の一つである供試体のサクシオンを取り上げて、せん断強度に対する影響を調べることである。

不攪乱試料に対して、サクシオン測定が可能な 1 次元圧密試験装置を用いてサクシオンを測定した 1 次元圧密試験を行った。圧密試験に引き続いて供試体を一面せん断試験機に移し一面せん断試験を実施した。一面せん断試験は力学的条件に曖昧さを残すなどの問題があるが、その反面、簡便であることなどの実務的利点がある。また、これまでの三軸圧縮試験による研究⁷⁾から、強度がばらつくので、有意な結論を引き出すためには試験個数を多くすることが必要であると実感した。さらに、対象試料は非常に脆いので三軸圧縮試験のような細長い供試体の成形が難しいのも理由になっている。

本論文ではサクシオン測定圧密試験の結果に基づいて圧密過程におけるサクシオンの挙動を詳細に考察する。一面せん断試験の結果に対して同じ圧密圧力のもとでせん断強さに対する含水比、間隙比およびサクシオンの影響度を調べる。結論として、用いた試料では圧密降伏応力より高い圧密荷重を載荷するとサクシオンが消滅すること、同じ垂直応力の下でせん断強さは、間隙比や含水比との関係に比べてサクシオンとの相関性が極めて良好であることなどを示す。

2. 試料

2.1 採取方法と初期状態

試料は 2003 年 5 月に鳥取県倉吉市内で採取した DKP 不攪乱試料である。以下、過去の研究²⁾⁻⁴⁾で用いた試料と区別する場合、本試料を DKP3 と記す。不攪乱試料はプロ

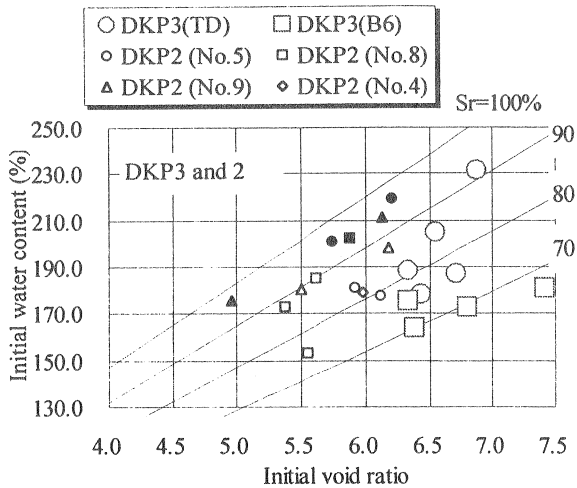


図-1 不攪乱状態での間隙比と含水比の関係

ックサンプリングとシンウォールチューブ挿入法で採取した。ブロックサンプリング試料には、記号 B を (例えば No. B6-1-2 など)、シンウォールチューブ試料には記号 T を (例えば No. TD-1 など) それぞれ付けた。ここに T や B に引き続く番号 (またはアルファベット) はブロック (またはチューブ) を識別するために、さらに、ハイフンに続く番号はそのブロック (またはチューブ) から整形した供試体を識別するための記号である。

力学試験用供試体を整形した時の試料の状態を含水比と間隙比との関係で表した (図-1)。図には過去の研究²⁾⁻⁴⁾で用いた試料 (DKP2) のデータも併せて示した (● および▲は DKP2 の○および△とそれぞれ同じ試料であるが人為的に飽和度を高めたものである)。図中の実線は飽和度をパラメータにした理論的關係である。理論的關係には土粒子密度の値が必要であるが、各試料 (DKP2 または DKP3) の平均値を用いた (土粒子密度の値については後述)。

この図からわかるように、DKP3 では、間隙比は最大 7.4、含水比は最大 230%にもなっている。また、DKP3 は DKP2 に比べて間隙比が大きい。さらに、両試料とも一つのブロックにおいても供試体間で間隙比や含水比が大きく異なっていて、極めて不均質であることがわかる。

用いた試料は自然含水状態で乱さないときには、非常に脆いが、ブロックや力学試験供試体の整形が可能である程度の固さを有する。しかし攪乱するとぼろぼろとなり、さらにこね返すとどろどろした液体状になる。その様子を図-2 に示した。本試料が地元で「味噌土 (みそつち)」または「水土 (みずつち)」と呼ばれる所以である。

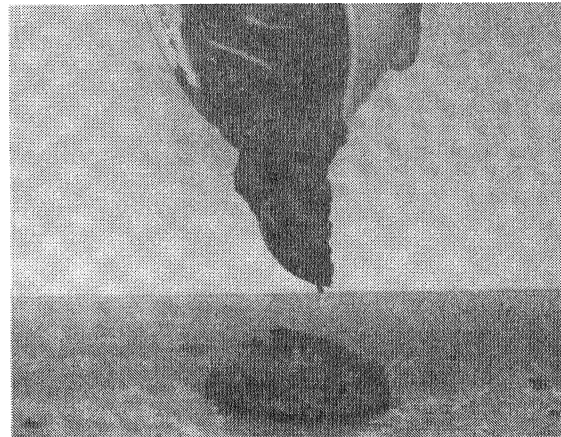


図-2 自然含水比のまま練り返したときの様子

2.2 物理的性質

(1) 粒度

粒径加積曲線を図-3 に示す。下に述べるように測定方法によって差があるものの、粗粒分から細粒分まで幅広い粒径の粒子から成る。特に細粒分が約 50%含まれている。

粒度の測定には工夫が必要である。DKP3 は含水比の不均一性と乾燥による団粒化の影響を避けるために「全質量測定水中ふるい分け法」⁸⁾で測定した。この方法の基本を述べる。通常の方法では粒度試験に用いた試料の土粒子質量を、試料の一部の含水比から間接的に推定する。この試料は含水比が不均一のため通常の方法ではふるい分けと沈降分析の結果が整合的でなくなってしまうこともある。そこで試験に用いた試料のすべての土粒子質量を直接測定する。また乾燥によって細粒分が団粒化してしまうので、乾燥を避けるためにふるい分けを水中で行う。

図-3 では全質量測定水中ふるい分け法による結果を TMW と記している。さらに特殊な攪拌装置を用いて試料の分散を高めた結果を TMW_M と記した。その装置は試料

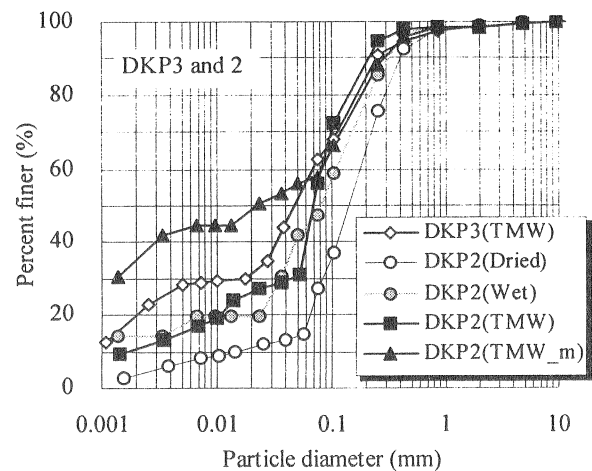


図-3 粒径加積曲線

表-1 コンシステンシー限界と土粒子密度

Liquid limit	131 %
Plastic limit	77 %
Soil particle density	2.783 Mg/m ³

を入れた容器を自転させながら同時に公転させることができるものである。

(2) コンシステンシー限界

液性および塑性限界の値を表-1 に示す。火山灰質粘性土のコンシステンシー限界は乾湿の履歴の影響を顕著に受けることが指摘されている⁹⁾。そこで湿潤状態でパテ状になる程度まで適度に空気乾燥させてから試験を行った。そのようにしても加水過程と減水過程で液性限界に差が生じた(10 から 20%)。塑性限界試験は減水過程で行ったが約 30%の範囲で結果がばらついた。表-1 に示した値はそれらの平均値である。

コンシステンシー限界に対する加水・減水の影響については別途詳細に論じた¹⁰⁾。

(3) 土粒子密度

表-1 に土粒子密度試験の結果を示す。試料には密度の大きい小礫(角閃石)を含んでいるのでそれを含む場合と含まない場合で結果が異なる。偏りが生じないように十分攪拌して測定した。また、脱気方法として湯煎と真空脱気を併用した方がよく脱気できた。表-1 に示した値は 16 個の測定値の平均値である。

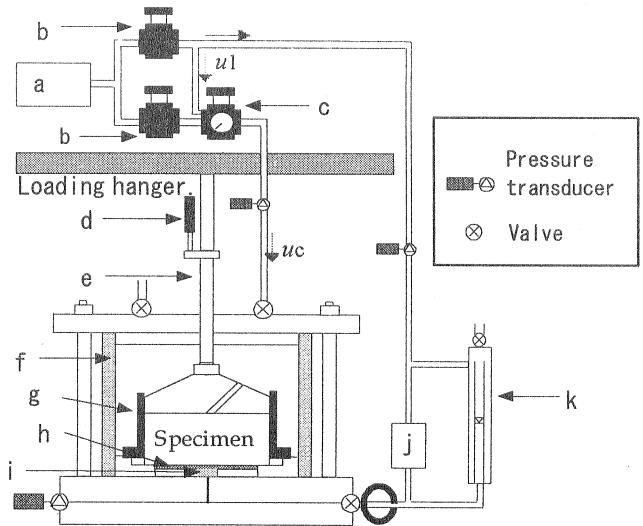
土粒子密度試験結果に対する脱気方法の影響についても別途詳細に論じた¹⁰⁾。

3. 力学試験の方法

これまでの研究において採用したのと同じ方法⁸⁾で供試体を作成した。試料ブロックを電動ワイヤーカッターで予め分割し、分割された小塊から直径 6 cm、高さ 2 cm の円柱供試体に整形した。供試体整形の段階で特別の工夫をしている。

各供試体に対してサクシオン測定圧密試験を実施し、その後、一面せん断試験機に供試体を移し替えてせん断した。

サクシオン測定圧密試験は図-4 に示す装置¹¹⁾を用いて行った。圧力セル内に圧密容器が設置されており、圧密容器には供試体底面に接するようにセラミック板が装着されている。セラミック板底面で間隙水圧を測定する。加圧板にはセル圧が間隙空気圧として作用するように小孔をあけている。サクシオンは加圧法で測定した、即ち、セラミック板の空気侵入値より低いセル圧即ち間隙空気圧を作用させてそれに対応する間隙水圧を測定し、間隙



- a: Air compressor.
- b: Air pressure regulator.
- c: Differential pressure regulator.
- d: Displacement sensor.
- e: Loading ram.
- f: Pressure cell.
- g: Oedometer ring.
- h: Ceramic plate.
- i: Porous stone.
- j: Differential pressure transducer.
- k: Double tube burette.

図-4 サクシオン測定圧密試験装置¹¹⁾

空気圧と間隙水圧の差としてサクシオンを定義した。加圧法はサクシオンを測定するのに一般に利用されている方法であり、間隙空気圧を作用させて間隙水圧を正の値にして測定するので、負圧が測定できない間隙水圧計でも使用できる、さらに間隙水圧計に通じる径路内で余分な気泡が発生するのを防ぐことができるという利点がある。

供試体を圧密試験機に設置して、鉛直圧密荷重を載荷しない状態でセル圧(=間隙空気圧) 150kPa を作用させてサクシオンを測定した。本論文ではこのサクシオンを「初期サクシオン」と言う。

次いで所定の圧密荷重を載荷し、供試体の圧縮量、間隙水圧を経時的に測定した。間隙水圧が平衡状態に達してから次の荷重段階に移行した。最大圧密圧力は 80kPa または圧密降伏応力より高い値に設定した。後者のうち供試体 No. TD-1 は 640kPa まで圧密したのち 80kPa まで除荷して人工的な過圧密状態にした。

せん断強度に対するサクシオンの影響を考察する目的で最終荷重段階で底面排水を許し、サクシオンを所定の値に制御した。このサクシオンを「圧密試験終了時のサクシオン」という。

圧密試験が終了後、供試体を圧密容器から取り出して一面せん断試験機に移し替えてせん断試験を行った。圧密・定圧の条件で、0.05mm/分の緩速でせん断した。せん断時の垂直応力はどの供試体も圧密試験時に与えた最終の圧密荷重に等しくなるようにした。

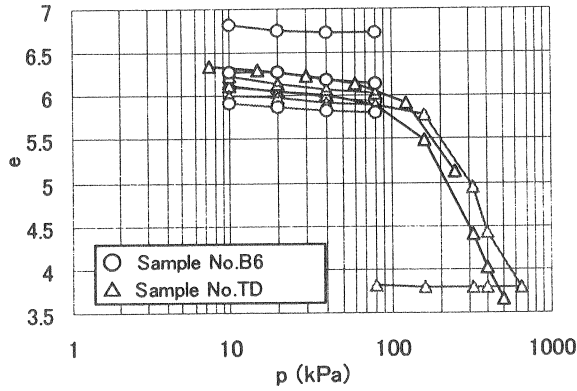


図-5 間隙比 e と圧密圧力 p の関係

上述の「圧密試験終了時のサクシオン」は、供試体を圧密容器から取り出し一面せん断試験機に移し替えたのでせん断試験直前に供試体が有しているサクシオンと異なることが予想される。せん断強さとサクシオンの関係を議論するためにはせん断試験直前のサクシオンの値を知ることが重要である。そこで、圧密試験からせん断試験に至る過程で起こるサクシオンの変化量を評価するために一部の供試体に対して供試体移し替えの模擬試験を行った。模擬試験では、一旦供試体を圧密容器から取り出し、せん断試験機ではなく圧密試験機の圧密容器に再度設置して、先に圧密試験で与えたのと同じ荷重履歴を与えてその間のサクシオンを測定した。圧密容器からの取り出し・再設置の過程は模擬試験以外の試験で要したのと同じ時間となるようにした。

4. 力学試験の結果と考察

4.1 間隙比-圧密荷重関係

サクシオン測定圧密試験の結果から得られた間隙比 e と圧密荷重 p の関係を図-5 に示す。圧縮曲線は供試体によって異なることがわかる。特に、同じブロックから切り出された供試体であっても、圧縮曲線が異なることが特徴的である。圧密降伏応力 p_c はキャサグランデの方法で 130-160 kPa と決定された。

4.2 圧密時のサクシオンの挙動

初期サクシオンの測定結果の一例を図-6 に示した。間隙空気圧 u_a を作用させた直後から底面間隙水圧 u_w が上昇し、約5分で u_w は平衡状態に達している。このときの u_a と u_w の差が初期サクシオンである。

含水比と初期サクシオンの間には明確な相関関係が見られなかった。同じ含水比であっても初期サクシオンは異なる。因みに用いた試料では初期サクシオンは 5~30 kPa の範囲にあった。

圧密荷重を作用させたときの間隙水圧 u_w と供試体圧縮

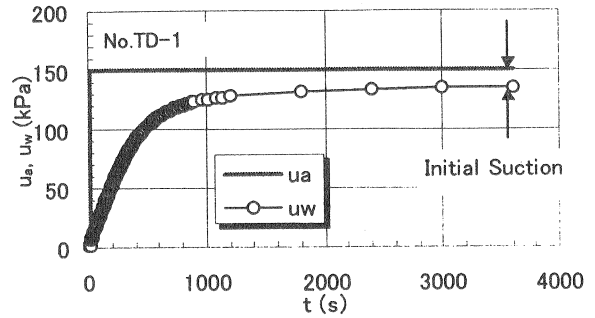
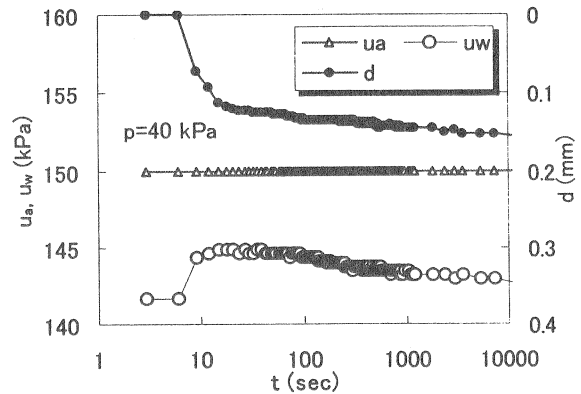


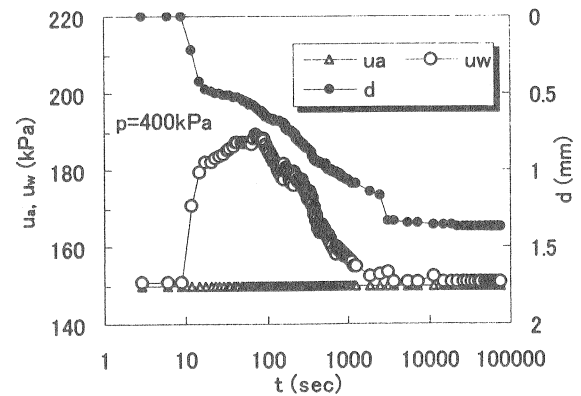
図-6 初期サクシオンの測定結果の一例 (供試体 No. TD-1)

量 d の変化挙動の一例を図-7 に示した。図-7 (a)は荷重が相対的に小さい場合、(b)は大きい場合である。荷重が小さいとき、荷重とともに u_w は上昇するが最も高いときでも間隙空気圧 u_a のレベルには達していない。それに対して荷重が大きいたときは u_w は u_a より高くなり、即ち過剰間隙水圧が発生して間隙水が供試体外へ排出される。実際、加圧板の小孔から排水が観察された。排水を伴う圧密の進行とともに u_w は減少し、圧密の終了時には再び u_a に等しくなる。

どの程度の荷重レベルに達すると間隙水が排水するか。図-8 は荷重変化の全過程における間隙水圧の変化を



(a) $p=40\text{kPa}$ ($\leftarrow 20\text{kPa}$)



(b) $p=400\text{kPa}$ ($\leftarrow 320\text{kPa}$)

図-7 載荷時の間隙水圧と鉛直変位の時間的变化 (供試体 No. TD-1)

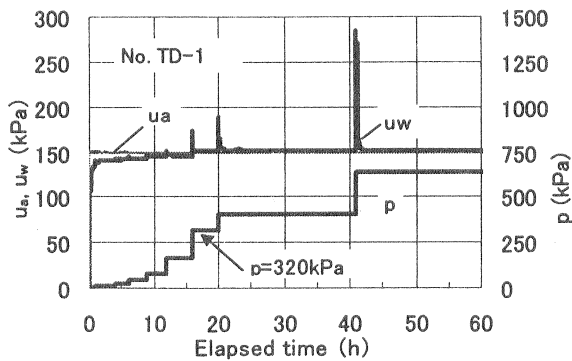


図-8 荷重全過程における間隙水圧の時間的变化 (供試体 No. TD-1)

表したものである。この図によれば $p=160\text{kPa}$ を荷重したとき荷重後早期に間隙水圧 u_w が間隙空気圧 u_a を上回っているが時間とともに u_a より低い値に消散した。次の段階 $p=320\text{kPa}$ では平衡状態になったときの u_w は u_a と等しくなった。これは、この荷重段階でサクシオンが消滅したことを意味している。先に記したように、この試料の圧密降伏応力 p_c は $130\text{--}160\text{kPa}$ であるので、圧密荷重が p_c を超えるとサクシオンが消滅した、といえる。ただし、サクシオンが消滅するような荷重と p_c の関係は、試料の飽和度に深く関係していると考えられるので、一般的な結論とする確証はない。

荷重増分と間隙水圧変動量の関係を調べた。荷重増分の荷重による間隙水圧の発生量と荷重増分との比、即ち B 値を求めた (図-9)。B 値は p が p_c より低い段階では p との関係に一定の傾向を見出せない。荷重 p が p_c を超えると B 値は p とともに増大する。作用させた荷重レベルでは B 値は高だか 0.6 程度にしかならなかった。試料が完全に飽和したとは言えないことを示唆している。

供試体 No. TD-1 は $p=640\text{kPa}$ まで荷重した後段階的に除荷した。除荷段階では極端に B 値が小さいことがわかる。除荷しても間隙水圧はほとんど低下せず間隙空気圧に近いレベルで試料内に保持されることを表す。換言すると除荷しても大きなサクシオンは生じなかった。

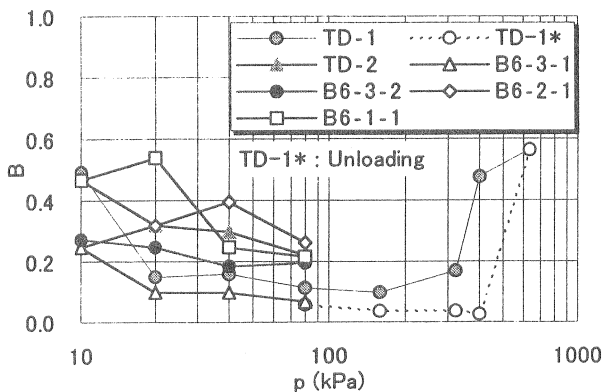


図-9 圧密圧力と B 値の関係

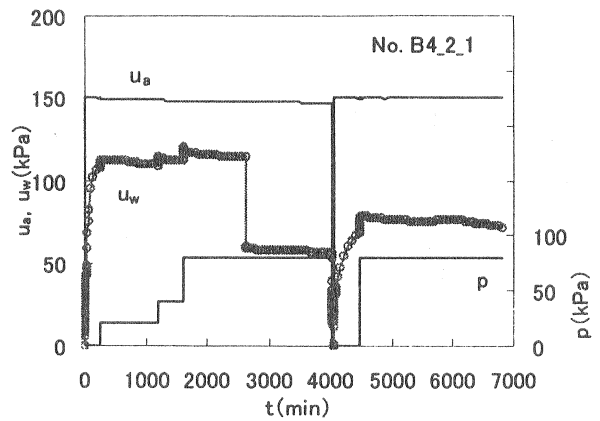


図-10 模擬試験の結果

4.3 模擬試験の結果

図-10 は模擬試験の結果である。圧密試験機でサクシオン測定圧密を行い、4020 分経過したとき供試体取り出しのための操作を開始した。荷重を瞬時に取り除き、次いで非排水状態にしてセル圧をゼロにし、セルを解体して供試体を取り出した。供試体の質量を測定した後、供試体を圧密試験機に再設置し、セルを組み立てて所定の空気圧を作用させた。荷重除去から空気圧作用開始まで約 18 分経過した。この時間が模擬試験以外の試験で供試体の移し替えに要した平均的な時間である。

圧密試験の段階で荷重を 80kPa まで段階的に荷重した。 80kPa の圧密段階でサクシオンが 90kPa になるように間隙水圧を制御している。再設置時の無荷重状態でのサクシオンは圧密試験終了時のサクシオン (90kPa) より低くなった。再設置後もとの荷重 (80kPa) を荷重することによってサクシオンは一時的にさらに低下したが時間とともに復活する傾向が見られた。結局、圧密終了後再設置までにサクシオンは約 10% 減少した。このサクシオンの減少は供試体の取り出し・再設置の過程で必然的に生じるであろう供試体の乱れによるものと推察される。

サクシオンの減少量は 10% 程度と比較的小さいものであった。よって圧密試験終了時のサクシオンがほぼせん断試験開始時のサクシオンを表し得ていると解釈して、次節ではせん断強さの影響要因として圧密終了時のサクシオンを用いて考察する。

4.4 せん断強度

せん断強さ τ_f と垂直応力 σ の関係を図-11 に示す。この図には従来の結果 (試料 DKP2) も併せて示した。図中塗りつぶしたマークは人工的に過圧密した供試体の結果を表す。

垂直応力 σ が圧密降伏応力 p_c より十分高いときは τ_f と σ は良好な直線関係を示すが、 p_c より低いときは両者の関係は一義的でない。供試体間の性質のばらつきと応力履歴

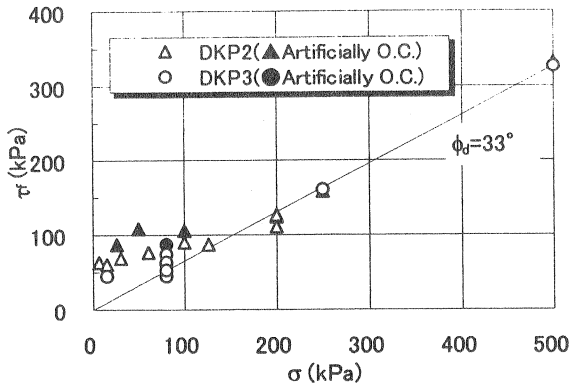


図-11 せん断強さ τ_f と垂直応力 σ の関係

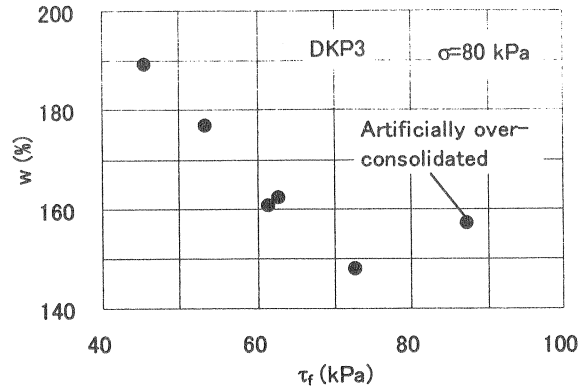


図-13 圧密試験終了時の含水比 w_c とせん断強さ τ_f の関係

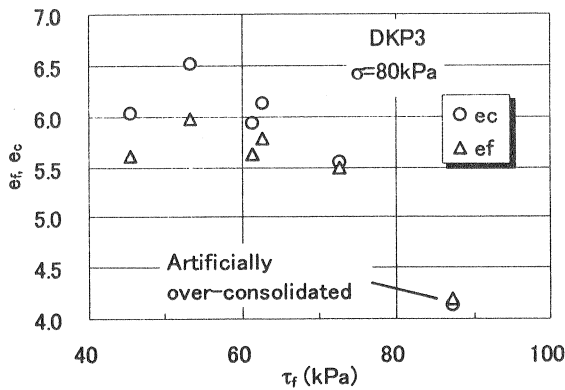


図-12 せん断強さ τ_f とせん断開始時間隙比 e_c および破壊時間隙比 e_f の関係

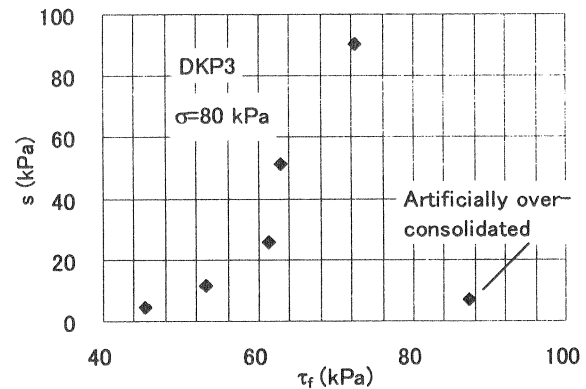


図-14 圧密試験終了時のサクシオンとせん断強さ τ_f の関係

歴の影響が含まれているためである。

以下、 $\sigma=80\text{kPa}$ でせん断したときの結果に基づいてせん断強さに与える間隙比と圧密試験終了時のサクシオンの影響について考察する。

せん断強さ τ_f と間隙比の関係を図-12に示した。間隙比はせん断直前のもの(e_c)とせん断応力最大時のもの(e_f)を取り上げた。図より、人工的過圧密を与えなかった供試体について、どちらの間隙比もせん断強さに対する明瞭な相関性が見られない。人工的過圧密を与えた供試体のせん断強さが大きいのは過圧密によって間隙比が小さくなったためである。ただし、人工的過圧密を与えたとき、その間隙比から期待される大きさのせん断強さが発揮されている保証はない^{3),4)}。本論文ではこの件は詳細に論じない。

せん断強さと含水比の関係を図-13に示した。せん断応力が最大の時の含水比は測定できないので圧密試験終了時すなわちせん断試験直前の含水比を示している。人工的過圧密を賦与した供試体を除いて、含水比が低いほどせん断強さが高いという明確な傾向が見られる。少なくとも間隙比との相関性に比べて良好である。しかし、詳細に見るとわずかにその傾向に矛盾する部分がある($\tau_f=60\text{kPa}$, $w=160\%$ 付近の二つのデータ)。なお、人工

的過圧密供試体が、他の供試体の傾向から想定されるよりも大きなせん断強さを発揮しているのは先に述べたように間隙比が小さいことの影響である。

せん断強さと圧密試験終了時のサクシオンとの関係を図-14に示す。サクシオンが高いほどせん断強さが大きくなるという傾向が明瞭である。含水比との関係において見られた部分的な矛盾も解消されている。人工的過圧密供試体のせん断強さは、サクシオンが低いにも拘わらず大きいのは間隙比が他の供試体に比べて低いためである。以上より、垂直応力が同じであれば、また人工的過圧密履歴を与えなければ、せん断強さはせん断試験開始時に供試体が有するサクシオンに強く支配されると言える。

5. 結論

本研究で得た主要な知見は次の通りである。

- (1) 供試体のサクシオンは圧密荷重の増加とともに減少する。用いた試料では圧密降伏応力 p_c より高い圧密荷重を載荷するとサクシオンが消滅した。
- (2) 人工的過圧密履歴を与えず、 p_c より低い垂直応力

でせん断したときのせん断強さは、間隙比との間に明瞭な相関性が見られなかったが、含水比との間には一義的ではないが高い相関性が見られた。さらにせん断試験開始時のサクシオンとの相関性は極めて良好であった。

本研究ではサクシオン測定可能な一面せん断試験が行えないため、サクシオン測定圧密試験の終了後に供試体を容器から取り出して一面せん断試験機に設置するという便宜的な方法を採用した。供試体の移し替えによるサクシオンの変化量は10%程度であり、圧密試験終了時のサクシオンがほぼせん断試験開始時のサクシオンを表していると解釈した。より厳密に議論するためにはサクシオン測定可能な一面せん断試験機を開発する必要がある。今後の課題としたい。

謝辞

不攪乱試料の採取に際して、山根裕文氏（鳥取県道路課）、新任修氏（西谷技術コンサルタント(株)）のお世話になった。また鳥取大学工学部土木工学科土質研究室の学生諸君の助力を得た。ここに記して謝意を表す。本研究の一部は文部科学省科学研究費（代表者清水正喜、No.13650543、H13-15年度）の補助を受けて遂行した。併せて謝意を表す。

参考文献

- 1) Shimizu, M.: Geotechnical features of volcanic-ash soils in Japan, Special Report B, Proc. of International Symposium on Problematic Soils, IS-Tohoku'98, Vol.2, pp.907-927, 1998.
- 2) 清水正喜：大山火山灰質土（DMP および DKP）の不攪乱試料のせん断強度特性，火山灰地盤の工学的性質の評価法に関するシンポジウム発表論文集，地盤工学会北海道支部，pp.187-192，2002.
- 3) 清水正喜：大山倉吉軽石（DKP）不攪乱試料のせん断特性と物理的性質，地盤工学会中国支部論文報告集，Vol.21，No.1，pp.71-78，2003.
- 4) Shimizu, M.: Shear strength of undisturbed samples of weathered pumice soils, Proc. of the Skempton Conference, Institution of Civil Engineers, London, UK, Vol.1, pp. 618-629, 2004.
- 5) Lo, K. Y.: Shear strength properties of a sample of volcanic material of the Valley of Mexico, Geotechnique, Vol.12, pp.303-316, 1962.
- 6) Hvorslev, M. J.: Physical components of the shear strength of saturated clays, Proc. ASCE Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, pp. 169-273, 1960.
- 7) Shimizu, M. and Nishida, N.: Undrained shear strength of undisturbed weathered-pumice soil, Proc. of International Symposium on Problematic Soils, IS-Tohoku'98, Vol.1, pp.169-173, 1998.
- 8) 清水正喜：大山松江軽石(DMP)不攪乱試料の一面せん断試験による変形・強度特性と物理的性質，地盤工学会中国支部論文報告集，Vol.19，No.1，pp.17-26，2001.
- 9) 例えば，土質工学会編：「日本の特殊土」，土質基礎工学ライブラリー10，p.38，1974.
- 10) 清水正喜・山本大輔：大山倉吉軽石の物理的性質：試験条件の影響，鳥取大学工学部研究報告，Vol.35，2004（投稿中）。
- 11) Shimizu, M. and Nambu, K.: One-dimensional compression and consolidation behavior of unsaturated soils and problems in experiments, Proc. of the 2nd Asian Conference on Unsaturated Soils, pp.117-122, 2003.

(2004年7月28日 受付)