

# 大山火山灰質土不攪乱試料のせん断強度特性 — 不飽和土として —

清水正喜

鳥取大学大学院（〒680-8552鳥取市湖山町南4丁目101）



大山起源の火山灰質粘性土は、我が国でも有数の鋭敏な土であり、攪乱を受けると強度が著しく低下するので土工が困難になる。通常の方法でせん断強度を決定すると強度が大きくばらつくことも知られている。本研究では、大山倉吉軽石の不攪乱試料に対して、不飽和土としての観点から、一面せん断試験を実施した。せん断中に加圧板側および反力板側の垂直応力を測定するとともにサクシオンを測定した。その結果、（間隙水圧や反力板側垂直応力を測定しない）従来の方法で試験すると強度のばらつきと判断されるような挙動を、間隙水圧や反力板側垂直応力を考慮することによって土質力学的に合理的に説明できることがわかった。

キーワード 火山灰質粘性土、大山倉吉軽石、せん断強さ、不飽和、一面せん断試験

## 1. はじめに

日本を含め極東および東南アジアは世界でも有数の火山地帯でありいわゆる火山灰質土に広く覆われている。我が国の火山灰質粘性土（細粒分が支配的な火山灰質土）の多くは、鋭敏であり、土工に際してトラフィカビリティーが極端に低下するなど、工学的な取り扱いが困難な問題土である<sup>1\*</sup>。

本報告では、西日本で代表的な問題土である大山倉吉軽石（DKP）を扱う。この土は、比較的飽和度の高い不飽和の状態で存在し、高含水比・高間隙比を有し、攪乱によって極端に強度が低下する超鋭敏な土である（図1）。

飽和粘性土の場合、せん断強度特性は間隙比および有効応力とその履歴で説明できる。火山灰質粘性土は、多くは不飽和状態で存在し、さらに、有効応力の履歴が不明であり、せん断強度特性をそのようなパラメーターのみで説明することは容易でない<sup>3</sup>。換言すると、土質力学の教科書のような挙動を示さないことが多い。例えば、圧密・定圧一面せん断試験において、特に、垂直応力が圧密降伏応力より低い場合、同じ垂直応力を作用させてもせん断強さが大きく変動し、場合によっては、垂直応

力を大きくするとせん断強さが低くなったりすることもある<sup>2,4</sup>。

著者らは大山火山灰質土である大山松江軽石（DMP）や大山倉吉軽石（DKP）のせん断強度特性に関する研究を進めてきた<sup>4,5,6</sup>。その過程で火山灰質土の強度評価のためには不飽和土としての取り扱いが必要なことが明らかになった。

不飽和土のせん断強度を評価するためには、サクシオンを考慮しなければならない。ここに、サクシオンとは間隙空気圧  $u_a$  と間隙水圧  $u_w$  の差 ( $u_a - u_w$ ) である。実際、DKP に対しても供試体のもつ初期サクシオンを考慮することによってせん断強度特性を合理的に説明できることがわかった<sup>6</sup>が、せん断中のサクシオンの挙動が不明で



図1. DKP を自然含水比で練り返した状態

\* 我が国の火山灰質土に関連する工学的諸問題を文献<sup>1</sup>で、また火山灰質粘性土の工学的性質に関する研究の現況を文献<sup>2</sup>で取りまとめて紹介している。

あった。そこで新たにサクシオン測定が可能な一面せん断試験装置を開発した<sup>7,8)</sup>。

本報告では、主としてその装置を用いて行った一面せん断試験の結果に基づいて、圧密およびせん断過程におけるサクシオンの挙動、ならびにせん断強さと垂直応力およびサクシオンとの関係について示す。

それらの結果から、火山灰質粘性土のせん断強度特性を把握するためには不飽和土として扱うことが重要であること、従って、サクシオンを測定できる装置を用いる必要があることを主張するものである。

## 2. 試料

鳥取県倉吉市で採取した大山倉吉軽石の不攪乱試料 (DKP3 と呼称) について、物理的性質と初期状態について述べる。

主な物理的性質は次のようである： $\rho_s=2.81(\text{g}/\text{cm}^3)$ ,  $w_L=125\%$ ,  $w_p=81\%$ , 細粒分含有率 30%以上。これらの指標は試料の乾湿履歴の影響を強く受ける<sup>9)</sup>。ここに挙げた値は平均的な値である。

図2は、試料の初期状態を間隙比と含水比の関係で表したものである。力学試験用に整形した供試体から測定したが、試料採取時に測定した値と大きな差はない。不攪乱試料ブロックを識別するために B4 や T5 などの記号を用いた。参考までに過去の研究<sup>6)</sup>で用いた試料

(DKP2) のデータも併せて示している。採取地点が DKP3 と異なるので DKP2 と記した。

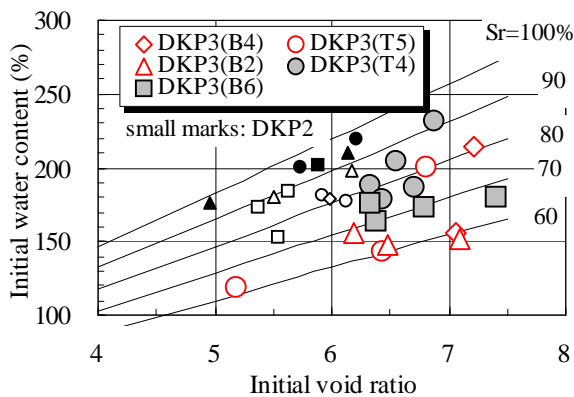


図2. 供試体の初期状態

DKP3 (B4, B2, T5) は最も最近に試験に供したものでやや乾燥が進んで含水比が低い。DKP2 のうち黒く塗りつぶしたマークは強制的に真空脱気して飽和度を高めたものである。それらを除いて、含水比は 150–230%、間隙比は 5.3–7.3、飽和度は 70–90%である。

この試料の圧密降伏応力  $p_c$  は 160kPa 程度、圧縮指数  $C_c$  は 3.8 であることがわかる (図3に標準圧密試験から

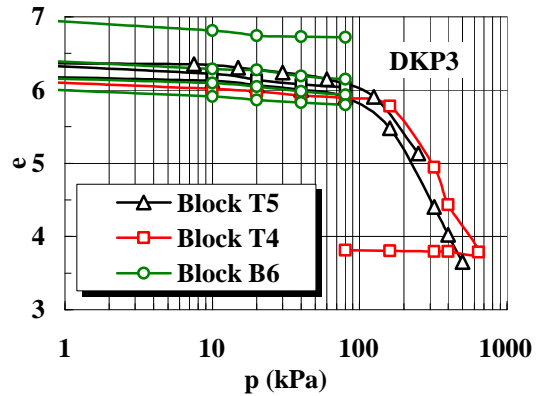


図3. DKP3 の圧縮特性 (標準圧密試験の結果)

得られた圧縮曲線<sup>6)</sup>を示す)。 $C_c$ はコンシステンシー限界から予測される値より大きい<sup>2)</sup>。

## 3. 装置と方法

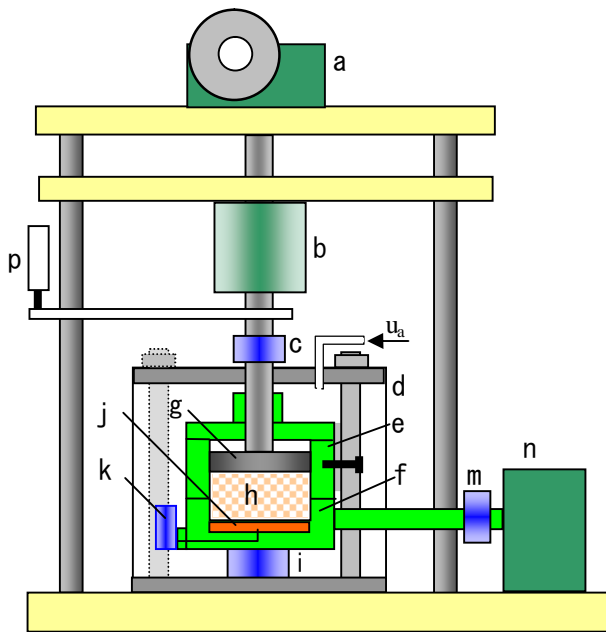
### (1) 試験装置

不飽和土用一次元圧密試験装置<sup>10)</sup>と2種類の一面せん断試験装置を用いた。不飽和土用一次元圧密試験装置は圧密容器を圧力セルの内部に設置し、圧密容器底部にサクシオン板を設置してサクシオンを制御・測定できる仕組みを有する。せん断試験装置の一つはサクシオンの測定ができない従来のもの (三笠式一面せん断試験機) である。他は圧密およびせん断の両過程でサクシオンの測定ができるように市販の試験機を改良したものである。

サクシオン測定が出来ない従来の装置でせん断試験を行った場合は圧密過程を不飽和土用一次元圧密試験装置で実施し、圧密過程およびせん断直前のサクシオンを測



図4. サクシオン測定が可能な一面せん断試験装置



a: 手動ジャッキ, b: ベロフラムシリンダー, c: 上部ロードセル (加圧板側垂直力), d: 圧力セル, e: 上せん断箱, f: 下せん断箱, g: 加圧板, h: 供試体, i: 下部ロードセル (反力板側垂直力), j: セラミック板, k: 圧力変換器 (間隙水圧), m: ロードセル (せん断力), n: せん断力载荷装置 (兼せん断変位測定装置), p: 変位計

図5. せん断試験装置 (模式図)

定した。

### (2) サクション測定可能な一面せん断試験装置

市販の一面せん断試験装置\*を改良したものである(図4および図5)。装置は上せん断箱(図5のe, 以下同様)が水平・鉛直方向固定で下せん断箱(f)が水平方向可動である。下せん断箱の下の荷重計(i)で垂直応力(反力板垂直応力;  $\sigma_v$ )を測定する形式である。

次の三点を改良した:

- 加圧版側の垂直応力 ( $\sigma_v$ ) を測定できるように加圧板 (g) 上部に荷重計 (c) を設置した。
- 供試体底面でサクションを測定できるようにした。即ち、下箱の底部に、供試体底面が接するようににセラミック円板 (j) を設置し、下箱外部に圧力変換器 (k) を取り付けた。セラミック板と圧力変換器の間は細孔で繋がっている。
- せん断箱全体を圧力セル (d) で覆い、供試体の間隙空気圧を測定・制御できるようにした。
- 上せん断箱はセル支柱に固定した。

\*地盤工学会基準 JGS0560-2000「土の圧密定体積一面せん断試験方法」および JGS0561-2000「土の圧密定圧一面せん断試験方法」に則って試験ができる。また、反力板側垂直応力の測定が可能である。ただし、加圧板側垂直応力を測定する装置は付随していない。

### (3) サクション測定一面せん断試験の方法

圧密中の間隙水圧またはサクションの挙動を調べるために底面非排水・上面排水で圧密した。圧密降伏応力  $p_c$  (=160kPa) より低い垂直応力でのせん断強度特性を解明するために、垂直応力  $\sigma_v=80\text{kPa}$  で圧密した。圧密後、定圧または定体積の条件でせん断した。せん断速度は  $0.05\text{mm/分}$  または  $0.02\text{mm/分}$  である。なお、定圧試験は加圧板側垂直応力  $\sigma_v$  を一定にして行った。

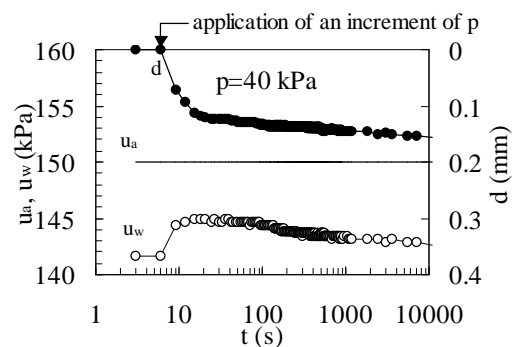
## 4. 結果と考察

### (1) 圧密圧力による間隙水圧およびサクションの挙動<sup>6)</sup>

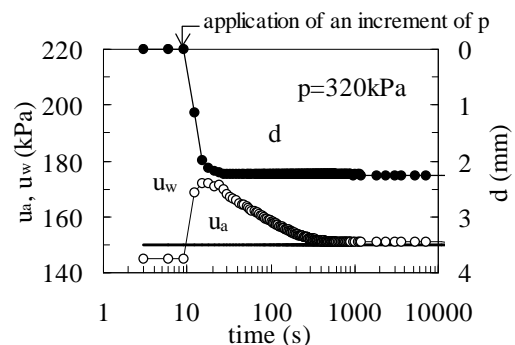
一つの供試体に対して、圧密圧力  $p$  を段階的に  $640\text{kPa}$  まで作用させ、次に  $80\text{kPa}$  まで除荷してせん断した。人工的な過圧密の履歴を与えたことになる。この供試体の試験結果を利用して圧密時のサクションの挙動について述べる。

一定の間隙空気圧  $u_a$  を作用させ、圧密荷重  $p$  を段階的に作用させると間隙水圧  $u_w$  は  $p$  とともに上昇する。 $p$  が低いときは  $u_w$  は  $u_a$  より小さいが  $p$  がある大きさ以上になると  $u_w$  は  $u_a$  と等しくなる。

間隙水圧  $u_w$  は時間的に変化する(図6(a), (b))。载荷の瞬間に  $u_w$  はある量だけ上昇し時間とともに低下して一定になる。 $p$  が相対的に低い場合(図6(a))は、载荷の瞬間も平衡時にも  $u_w$  は  $u_a$  より小さい、即ち、サ



(a) 圧密圧力が  $p_c$  より小さいとき ( $p=40\text{kPa}$ )



(b) 圧密圧力が  $p_c$  より大きいとき ( $p=320\text{kPa}$ )

図6. 圧密過程における間隙水圧の挙動

クシオンは常に正である。一方、相対的に大きい荷重を  
 載荷すると、 $u_w$  は瞬間に上昇して  $u_a$  を超え、時間が経  
 つと  $u_a$  と等しい大きさで収束する (図 6 (b))。この供  
 試体では 320kPa 以上の荷重を作用させるとサクシ  
 オンはゼロになった。

除荷時には  $u_w$  は一旦減少し、時間とともに回復する。  
 平衡時には  $u_w$  と  $u_a$  が等しくなった。即ちサクシオンは  
 ゼロのままである。

荷重変化量に対する間隙水圧変化量の割合  $B$   
 ( $=\Delta u_w/\Delta p$ ) と  $p$  の関係について述べる。この供試体で  
 は、 $p$  が低い段階では  $B$  値は 0.2 程度と小さいが  $p$  が  
 400kPa 以上になると 0.5 を超えた。サクシオンが 0 にな  
 るような高い  $p$  に対しても  $B$  値はせいぜい 0.6 程度であ  
 った。ただし、このような高い荷重段階では供試体の上  
 面から排水が生じた。また、計算上も飽和度は 100% に  
 達した。

## (2) サクシオン測定一面せん断試験の結果

### a) 圧密段階の挙動

圧密圧力を載荷する前に供試体の初期サクシオンを測  
 定した (図 7)。この例では  $u_w$  は約 100 分以降ほとん  
 ど変化せず、 $u_a$  と  $u_w$  の差が 55kPa で平衡状態に達してい  
 る。即ち、初期サクシオンは 55kPa である。

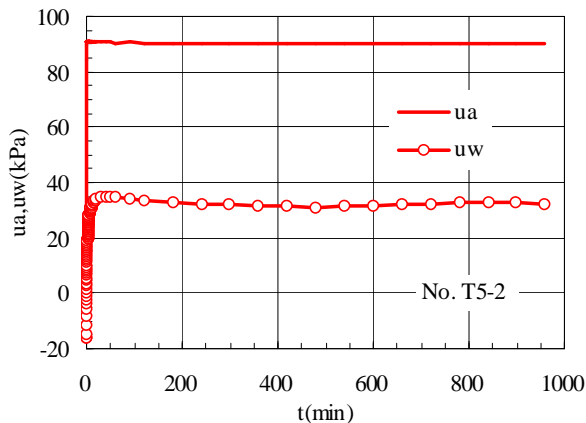


図 7. 供試体の初期サクシオンの測定例

図 8 は 80kPa の垂直応力を作用させたときの  $u_a$ ,  $u_w$ ,  
 加圧板側垂直応力  $\sigma_U$ , 反力板側垂直応力  $\sigma_L$  および鉛直  
 変位 (圧密量)  $d$  の時間的な変化である。まず、 $u_w$  は垂直  
 応力載荷とともにやや時間的な遅れを伴って増加しその  
 後減少している。鉛直変位  $d$  は載荷とともにほぼ瞬時的  
 に生じ、その後、わずかに二次圧密的な挙動を示してい  
 る。反力板側垂直応力  $\sigma_L$  は作用させた垂直応力 ( $\sigma_U$ )  
 の変化と同時に変化しているが低い値で収束している。  
 これは圧密によって供試体が圧縮し、供試体周面に上向  
 きの摩擦力が働いたためである (図 9 参照)。この周面  
 摩擦の影響は、後述するように、せん断強度を評価する  
 際にも問題を複雑にする要因になる。

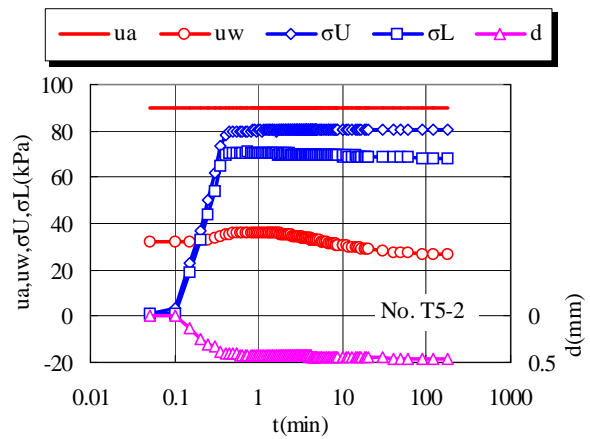


図 8.  $\sigma=80\text{kPa}$  を作用させたときの  $u_a$ ,  $u_w$ ,  $\sigma_U$ ,  $\sigma_L$  およ  
 び  $d$  の時間的な変化

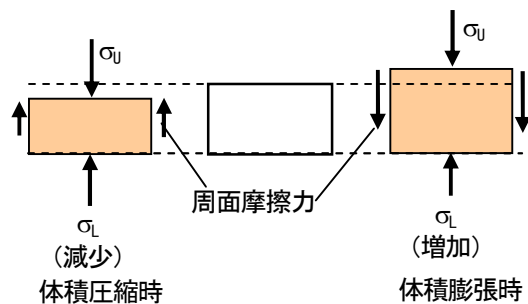


図 9. 体積変化挙動と周面摩擦力の関係 (模式図)

### b) せん断時の挙動

せん断過程での  $u_a$ ,  $u_w$ ,  $\sigma_U$ ,  $\sigma_L$ ,  $d$  およびせん断応力  $\tau$   
 とせん断変位  $\delta$  の関係を図 10 に示した。

加圧板側の垂直応力  $\sigma_U$  は設定通り一定値 ( $=80\text{kPa}$ ) に  
 保たれていることがわかる。一方、反力板側垂直応力  $\sigma_L$   
 はせん断開始時にわずかに増加し、すぐに減少に転じて  
 せん断終了まで減少傾向を続けている。

せん断の進行とともにせん断応力は増加してこの例で  
 は  $\delta=2\text{mm}$  でピークに達し、その後緩やかに減少してい

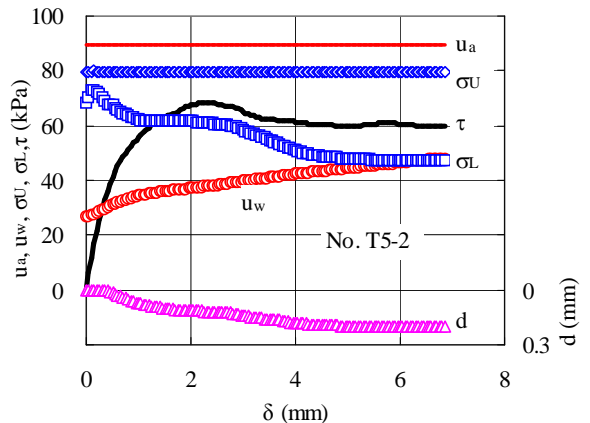


図 10. せん断過程での  $u_a$ ,  $u_w$ ,  $\sigma_U$ ,  $\sigma_L$ ,  $d$  および  $\tau$  と  $\delta$   
 との関係

る。鉛直変位（ダイランシー量） $d$  はせん断開始時に極めて微小であるが膨張しその後すぐに体積収縮に転じ、せん断終了まで体積は収縮しつづけた。この  $d$  の変化挙動は上述の  $\sigma_L$  の変化挙動と符合している。即ち、体積が膨張する時は供試体周面に下向きの摩擦力が作用しその結果  $\sigma_L$  は上昇する。体積が収縮する時は反対に上向きの周面摩擦力が作用して  $\sigma_L$  は減少する。

間隙水圧はせん断中上昇を続けている。定圧条件の試験（飽和土の排水試験に相当）を企図したがこのように供試体底面の間隙水圧が変化した。この供試体のせん断速度は 0.05mm/分であったが、速すぎた可能性もあったので、他の供試体に対してせん断速度を 0.02mm/分と遅くした。遅い速度せん断してもやはり間隙水圧は変化した（間隙水圧が変化しなかった場合もある）。間隙水圧を測定しているのだから、間隙水圧の応答に対処できる速度であれば問題がないと考えられる。この問題は飽和土の場合にも起こりうることで今後検討する必要がある。

### (3) せん断強度特性<sup>6), 7), 8)</sup>

#### a) せん断強度と垂直応力の関係

過去の研究<sup>9)</sup>から明らかになったせん断強度に関する基本的な特性をまず述べる。

この試料は圧密降伏応力  $p_c$  以上の垂直応力の下ではせん断強度は Mohr-Coulomb の破壊基準で説明できるが、 $p_c$  より低い垂直応力の下では複雑なせん断強度特性を示す（図 11 参照）。

飽和土の場合、 $p_c$  以下の垂直応力の下での強度は、過圧密比（過圧密の履歴を表すパラメータ）を導入することによって、説明できる。しかし、この試料は、 $p_c$  以下では不飽和であり、また、人工的な過圧密の履歴を与えない限り、圧密の履歴が明らかでない。

不飽和土のせん断強度は正味の垂直応力  $\sigma_{net} (= \sigma - u_a)$  とサクシヨンの関数である、というのが定説である。そこで、 $p_c$  より十分小さい  $\sigma = 80\text{kPa}$  のもとで供試体のサクシヨンを制御してせん断強度に対するサクシヨンの影響について調べた（図の○DKP3(s regulated)）。図では同じ

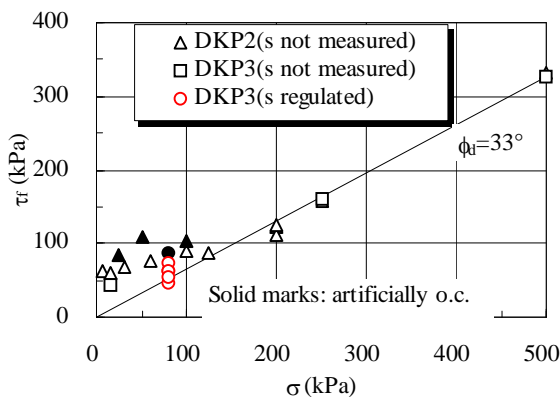


図 11. DKP2 および DKP3 の基本的強度特性

垂直応力に対して異なったせん断強さがあるように見える。これは、下で詳述するが、サクシヨンが異なっていることと破壊時の加圧板側の垂直応力が異なっていることを反映している。

次に、サクシヨン測定可能な一面せん断試験によって得られた結果に基づいてせん断強度と垂直応力の関係をより詳細に検討する。図 12 にせん断中のせん断応力  $\tau$  と二種類の垂直応力 ( $\sigma_U$ ,  $\sigma_L$ ) の関係を示す。原点を通る直線は、 $p_c$  より十分大きい垂直応力で試験した時のせん断強度線と図 11 の直線と同じである。

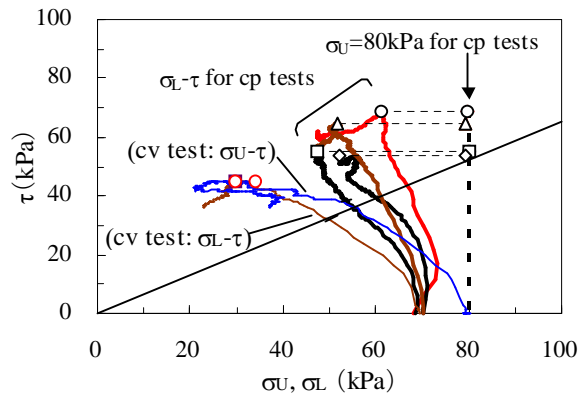


図 12. せん断中のせん断応力  $\tau$  と垂直応力 ( $\sigma_U$ ,  $\sigma_L$ ) の関係（せん断開始時の  $\sigma_L$  はどの試験も 80kPa）せん断強度とサクシヨンの関係

まず、定圧せん断試験（cp test）の結果について考察する。上に述べたように  $\sigma_L$  はせん断中に減少する。せん断強さ（ $\tau$  のピーク値： $\tau_p$ ）を  $\sigma_U$  に対してプロットすると同じ垂直応力に対してせん断強さが異なり、強度がばらつくという認識に至る。一方、 $\tau_p$  を  $\sigma_L$  に対してプロットすると、やはりばらつきは見られるものの、 $\sigma_L$  が大きいほど  $\tau_p$  が大きいという相関性が見られる。このばらつきは後述するようにサクシヨンの隠れた効果に起因する。

次に定体積せん断試験（cv test）の結果を見る。この試験では  $\sigma_U$  も  $\sigma_L$  も変化している。ピーク強度  $\tau_p$  と  $\sigma_L$  の関係は先の定圧試験で見られた傾向と矛盾していない。

#### b) せん断強度とサクシヨンの関係

図 13 はせん断中のせん断応力  $\tau$  とサクシヨンの関係である。○はせん断開始時のサクシヨン  $s_c$  と  $\tau_p$  の関係を表している。また、過去の研究で得られたせん断強さと圧密終了時のサクシヨン ( $s_c$ ) の関係も併せて示している（図の△）。

せん断中にサクシヨンは変化した場合とほとんど変化しなかった場合があった。せん断開始時のサクシヨンが大きいものはせん断中のサクシヨンが大きく減少する傾向がある。せん断応力のピーク  $\tau_p$  と  $s_c$  の関係を連ねて一つの包絡線を引くと図のようになった。定体積試験を除

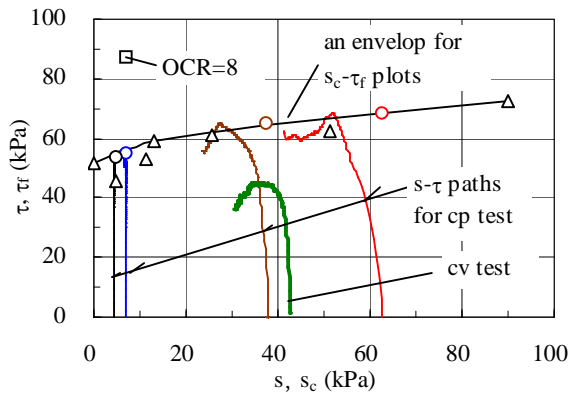


図 13. せん断中のサクシオン  $s$  とせん断応力  $\tau$  との関係およびせん断開始時のサクシオン  $s_c$  と  $\tau_f$  の関係

いて、この包絡線は過去の研究の結果（一部を除いて）をも説明し得ることがわかる。また、せん断強さと垂直応力の関係（図 12 の cp-test）で指摘したばらつきが解消されていることに注意したい。

なお、包絡線は直線ではなく、非線形性を有している。この種の非線形性は多くの研究者によって指摘されていて（例えば文献<sup>11),12)</sup>）、Fredlundらの提案式<sup>13)</sup>の適用性の限界を示していると言える。

## 5. 結論

一次元圧密におけるサクシオンの挙動として次の知見を得た：

圧密降伏応力  $p_c$  より小さい圧密荷重  $p$  を載荷すると載荷直後に底面間隙水圧  $u_w$  は上昇するが時間とともに低下し、ある大きさのサクシオンは保たれる。一方、 $p_c$  より大きい  $p$  を載荷すると載荷直後に  $u_w$  は間隙空気圧  $u_a$  よりも大きくなり、時間とともに低下して  $u_a$  に等しくなる、即ち、サクシオンは消滅する。サクシオンが消滅するような大きな  $p$  を載荷すると供試体は飽和状態に至る。

サクシオン測定可能な一面せん断試験の結果に基づいて次の知見を得た。

同じ垂直応力（加圧板側垂直応力）でせん断した場合、せん断強さは供試体によって異なるが、反力板側垂直応力が大きい場合ほどせん断強さが大きいという相関性が見られた。せん断強さとせん断開始時のサクシオンとの間には極めて高い相関性がある。その関係は Fredlund らの提案式<sup>13)</sup>のように線形ではない。

以上の結果から、火山灰質粘性土のせん断強度特性を把握するためには不飽和土として扱うことが重要であると言える。

謝辞：ここで報告した研究の主要部分は山本大輔氏（株式会社ウエスコ）が鳥取大学大学院在学中に行った著者との共同研究の成果である。試験装置の開発に鳥取大学技術職員岩成敬介氏および本学卒業生中田健一氏の助力を得た。記して深甚の謝意を表す。また、研究の一部は文部科学省科学研究費補助金（No.1365043 研究代表者清水正喜）の補助を受けて行った。

## 参考文献

- 1) Shimizu, M. (1998): Geotechnical features of volcanic-ash soils in Japan, Special Report B, *Proc. Int. Sym. on Problematic Soils, IS-Tohoku'98*, Japanese Geotechnical Society, 2, 907-927.
- 2) 清水正喜・風間基樹(2005)：4. 火山灰質粘性土の工学的性質，講座「火山灰質土—その性質と設計施工—」，土と基礎，53-12, pp.107-114.
- 3) 清水正喜（1998）：「非理想土のせん断強度特性の評価」，中国地質調査業協会第 8 回技術講演会テキスト，pp.11-25.
- 4) Shimizu, M. & Nishida, N. (1998) : Undrained shear strength of undisturbed weathered-pumice soil, *Proc. of Int. Symposium on Problematic Soils, IS-Tohoku'98*, pp.169-179.
- 5) Shimizu, M. (2004): Shear strength of undisturbed samples of weathered pumice soils, *Advances in Geotechnical Engineering: the Skempton Conference*, ICE, UK, 1, 618-629.
- 6) Shimizu, M. Yamamoto, D. and Tahara, Y. (2006): Suction and its effects on shear strength of unsaturated undisturbed samples of a volcanic pumiceous soil, *Proc. of the 4th Int. Conf. on Unsaturated Soil*, UNSAT2006, ASCE, Vol.1, pp.1235-1246.
- 7) 清水正喜・山本大輔(2006)：大山倉吉軽石不攪乱試料のサクシオン測定一面せん断試験，鳥取大学工学部研究報告，第 35 号，pp.31-34.
- 8) Shimizu, M. & Yamamoto, D. (2007): Shear strength and suction behavior of an undisturbed volcanic soil, *Proc. of 13rd Asian Conf. Soil Mech. Geotech. Eng.*, Vol.1, pp.141-144.
- 9) 清水正喜・山本大輔(2004)：大山倉吉軽石不攪乱試料の物理的性質：測定方法の影響，鳥取大学工学部研究報告，第 35 号，pp.31-34.
- 10) Shimizu, M. and Nambu, K. (2003): One-dimensional consolidation of unsaturated soils and problems in experiments, *Proc. of the 2nd Asian Conference on Unsaturated Soils*, UNSAT-ASIA 2003, Japanese Society of Geotechnical Engineering, 117-122.
- 11) Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. and Clifton, A. W. (1996): Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction, *Can. Geotech. J.* 33, 379-392.
- 12) Gan, J. K. M., Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1988): Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test, *Can. Geotech. J.* 25, 500-510.
- 13) Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., and Widger, R. A. (1978): The shear strength of unsaturated soils, *Can. Geotech. J.* 15, 313-321.