

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

Deformation and strength characteristics in direct shear box tests on
Daisen Malsue Pumice (DMP) undisturbed samples and their physical properties

清水 正喜 Masayoshi SHIMIZU (鳥取大学工学部)

大山松江軽石の不攪乱試料の物理的性質およびその状態を明らかにし、同試料に対して圧密・定圧一面せん断試験を実施した。せん断試験の圧密過程における間隙比と垂直応力の関係から試料の圧縮特性を評価した。その特性を考慮してせん断変形挙動およびせん断強さに対する垂直応力および間隙比の影響を考察した。その結果、試料は物理的性質に不均質であること、圧密降伏応力(約200kPa)を境にして、圧縮性およびせん断強度特性が急変すること、圧密降伏応力よりも高い応力レベルではせん断強さは垂直応力および間隙比と強い相関性を示すが、低い応力レベルではそのような相関性は見られないことがわかった。低垂直応力域でのせん断特性は、試料の状態を表わす指標(間隙比、飽和度および含水比)で説明できず、他の未解明な要因がせん断特性を支配していると推察した。

キーワード：火山灰質土、大山松江軽石、一面せん断試験、せん断強度、間隙比、飽和度
(IGC: C06, D02, D05, D06)

1. はじめに

我が国は世界有数の火山国であり、火山起源の土(火山灰質土)が広く国土を覆っている。各地域に分布する火山灰質土は地域固有の名称で呼ばれ、各々独立に性質が解き明かされてきた¹⁾。山陰地方には大山起源の火山灰質土が広く厚く堆積しているが、その工学的に重要な物理的性質やせん断強度特性は必ずしも系統的に明らかにされていない。本研究は大山下部火山灰層の一部を形成する軽石層、大山松江軽石(DMP)の不攪乱試料を用いて、そのせん断変形・強度特性を解明することを目的としている。

これまで三軸圧縮試験によって有効応力の観点から非排水せん断強度特性を調べ、次のような知見を得ている^{2), 3)}：(1)試料は不均質であり初期間隙比と含水比が供試体によって大きく異なる、(2)せん断強度は初期の構造を強く反映する、(3)初期有効応力の2倍程度の圧力で圧密してもせん断強さは増加しない。

試料が極度に不均質であるため、結果はばらついたものになり、そこから有意な結論を得るためにはさらに多くの試験を実施する必要があると認識した。特に、初期の構造を強く反映する低応力レベルでのせん断特性を詳細に議論するために、実施が容易な一面せん断試験を多数行った。

本論文では、まず、試料の地学的位置づけ、不攪乱試料の採取方法、試験に供したときの状態および物理的性質について述べ、次いで、一面せん断試験の方法と結果を示す。結果に対して、試料の物理的状態を考慮して詳細に考察する。すなわち、一面せん断試験の圧密過程における圧密圧力と間隙比の関係をj用いて試料の圧縮特性について述

べる。次に、圧縮特性を考慮して、せん断変形・強度挙動における間隙比と垂直応力の影響について考察する。

2. 試料

試料は大山下部火山灰層の一部を形成する軽石層(大山松江軽石、DMP)の風化土である。試料の地学的位置づけ、不攪乱試料の採取方法、試験に供したときの状態および物理的性質について述べる。

2.1 試料の地学的位置づけ^{4), 5)}

中国地方の最高峰である大山には、直径30kmに及ぶ火山麓扇状地が広がっており、ここには、大山火山が噴出した火砕流と火山灰(降下テフラ)が厚く堆積している。これらは、まとめて大山火山灰層とよばれ、その堆積順に最下部、下部、中部、上部と区分されている。ただし、各区分を構成する軽石層は、大山の東麓と北～西麓で大きく2つに分かれており、堆積物には、それぞれ固有の分布域がある。

大山松江軽石は大山の西方に広く分布している。大山西麓域で3m、西方約80kmでも20cmの層を成す。起源は約13万年前と推定されている。この軽石にはカミングトン閃石が含まれていて、テフラとしての希少な鉱物的特徴を有する。同石は大山東麓の軽石層には含まれておらず、西麓に存在する軽石層として区別される要因となっている。

2.2 不攪乱試料採取方法

鳥取県西伯郡溝口町”フラワーパーク”建設現場切土

斜面において不攪乱試料を採取した。試料は約 5 m 四方の範囲内で互いに近接した地点で、約 15×15×20cm のブロック状に切り出した後、上から木製の角筒（蓋と底の無い木箱）で覆って採取した。木箱上下部と内部の隙間をパラフィンで充填した。パラフィンが十分固結してから運搬し、そのままの状態を空气中、室温で保存した。

試料は、採取後 1 年以上の期間にわたって一連の試験に供した。期間後半の試験時には飽和度が低下していたので一部の試料に対して飽和度を上げるべく調整した。飽和度調整方法は後述する。

2.3 試料の状態（含水比，間隙比，飽和度）

試料の状態を、間隙比，含水比および飽和度の相互関係として図 1 に示す。試料採取後 6 ヶ月以内（図 1 (a)）と一年経過後（同 (b)）に分けて示した。含水比は力学試験用供試体を成形したときの残試料から、間隙比と飽和度は供試体の体積と乾燥質量および別途行った土粒子密度試験の結果（詳細は後述）の平均値に基づいて算定した。図において各プロットは一つの供試体に対応している。マークの各種類は供試体を切り出したブロックを表している。直線は各飽和度に対応する含水比と間隙比の理論的關係である。また、ブロック名の付け方に特別の意味はなく、すべて上述の地点で同じ深度から採取した。MP11 および 16 のすべてと MP1 および 2 の大半は三軸試験に供した³⁾。それらは本論文において一面せん断試験の結果を述べるにあたり参照しない。

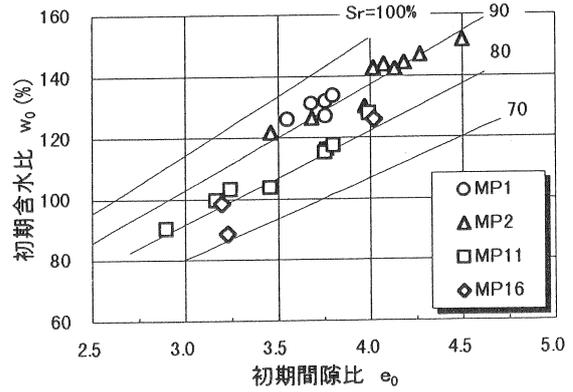
図 1 (b) で同一のブロック名に 2 種類のマークを割り当てているが、塗りつぶしたマークは飽和度を調整した供試体を指し、白抜きは調整しなかった供試体を指す。この記法は本論文を通して採用している。また、○のプロット（ブロック A 飽和度無調整供試体）のラベル記号は後の考察のために付した。

試料採取後 6 ヶ月以内では、最も早く試験に供したブロック（MP1, MP2）は、飽和度が 90% 前後の高い状態にあった。含水比は 120~150% であった。次に試験に供したブロック（MP11, MP16）は飽和度が約 80%，含水比は 85 から 125% であり、先に試験したブロックに比べていずれも低かった（図 1 (a)）。

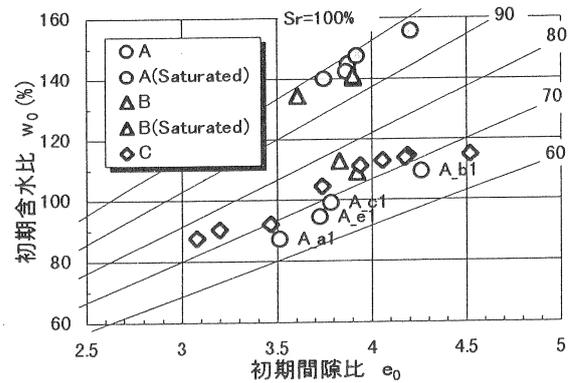
試料採取後 1 年を経過すると飽和度は 70% 前後まで低下したが、含水比は依然 90~110% と高い値を示している（同 (b)）。飽和度を調整した供試体は飽和度が 94% 以上、含水比は 130% 以上となった。

間隙比は $S_r \approx 90\%$ の高飽和状態で 3.5~4.5，飽和度が低下しても 1 供試体を除いて 3.0 以上ある。図 1 (b) において、ブロック A の、飽和度調整しなかったものと調整したものを比べると、飽和度を調整しても間隙比があまり変化していないことがわかる。

なお、これらの量（特に含水比と飽和度）は一つのブ



(a) 試料採取後 6 ヶ月以内



(b) 試料採取後約 1 年経過（塗りつぶしたマークは飽和度を調整した供試体を表す）

図 1 含水比，間隙比および飽和度の関係

ロックにおいても広範囲の値をとっていることに注意したい。ただし、飽和度は、含水比や間隙比に比べて、ブロック内での均一性が高いと言える。

2.4 物理的性質

(1) 土粒子の密度

供試体整形時に残った試料から土粒子密度を測定した。結果を図 2 に示す。測定個数は 27 個であり、50% 以上が $\rho_s = 2.60 \sim 2.65$ (Mg/m³) の範囲に入ったが、最大値 2.750，最小値 2.544 と広い範囲でばらついている。平均値は 2.624 Mg/m³ である。図のデータは、試料採取後 1 年経過

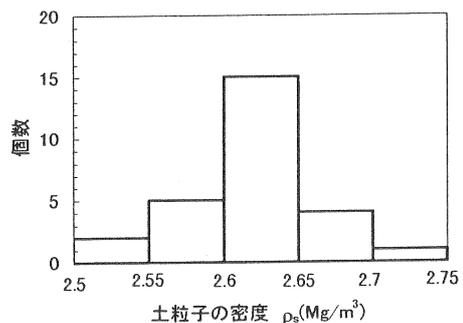


図 2 土粒子密度の頻度分布

して実施した試験の結果であるが、この傾向は試料採取後6ヶ月でも同じであった。ただし平均値は2.622 Mg/m³であった。

(2) コンシステンシー

非乾燥法で液性・塑性限界試験を行った。425μmふるいによる粒度調整を行った場合と行わない場合について試験した。粒度調整は水を加えながら同ふるいで裏ごしする方法を採った。

JISでは上述の粒度調整を行って試験するよう定められているが、本研究では次の目的で粒度調整しない状態においても試験した。試料は高い自然含水比を有しており、高含水状態で練り返しを受けると著しく軟らかくなる。そのような状態でのコンシステンシーの程度を把握する意味で粒度調整をしない状態で試験した。

結果を表1に示した。液性限界・塑性限界とも粒度調整を行った場合に大きな値が得られた。ただし、塑性指数には大きな違いがない。粒度調整の有無に依らず液性限界も塑性限界も非常に高いことが特徴的である。先に図1において試料は非常に高含水比であることを指摘したが、そのような高含水比でありながら、原位置において傾斜地盤を形成し、不攪乱試料の採取が可能なのはこのような高い液性限界を反映していると考えられる。なお、粒度調整をしない場合、粗粒分を含むため、試験者によっては塑性限界測定不能と判断することがある⁶⁾。

表1 コンシステンシー限界

	粒度調整なし	粒度調整あり
w _L (%)	115.2	140.2
w _P (%)	66.1	96.5
I _P	49.1	43.7

(3) 粒度特性

粒度試験をJIS1204⁷⁾で定められた方法とそれとは異なった方法で行った。方法の理解を容易にするためにJISで定められた粒度試験の方法を概観しておく。乾燥または非乾燥状態で準備された試料の一部を用いて含水比を測定し、試験に使用する試料の全炉乾燥質量(m_{1s})を推定する。2mmふるいにかけて、通過分と残留分に分ける。残留分は水洗いした後2mm以上のふるいでふるい分けする。通過分を沈降分析に使用するが、その一部で含水比を測定し、実際に沈降分析に使用する試料の炉乾燥質量(m_{2s})を推定する。沈降分析後、75μmふるいにかけて、通過分は捨て残留分は炉乾燥してから75μm以上のふるいでふるい分けする。

粒度分析を3種類の方法で行った(表2参照)。「非乾燥法」は試料を非乾燥の状態で使用して、試料の一部に対して測定した含水比から粒度試験全試料および沈降分析

用試料の炉乾燥質量(m_{1s}およびm_{2s})を推定したもの、「乾燥法」は試料を気乾燥させて「非乾燥法」と同様の方法で炉乾燥質量を推定したもの、さらに「水中・全質量測定法」はすべてのふるい分けを水中で行いすべての炉乾燥質量を実際に回収した試料を炉乾燥して求めたものである。「水中・全質量測定法」は、下に述べるように、他の方法の問題点を改善するために採用したものである。なお、「非乾燥法」および「乾燥法」での炉乾燥質量の求め方は上述のJISで規定された方法である。

表2 粒度試験の方法の比較

	乾燥法	非乾燥法	水中・全質量測定
粒度試験前の試料の乾燥	乾燥	非乾燥	
粒度試験に使用した試料全体の炉乾燥質量(m _{1s})	試料の一部の含水比から推定*		各操作が終了した時点で炉乾燥質量を測定
沈降分析に使用した試料の炉乾燥質量(m _{2s})	試料の一部の含水比から推定*		沈降分析終了後に炉乾燥質量を測定
ふるい分け	炉乾燥試料を空气中でふるい分け/質量測定*		水中でふるい分け/各ふるい残留分を炉乾燥して質量測定

*: JISに定められた方法

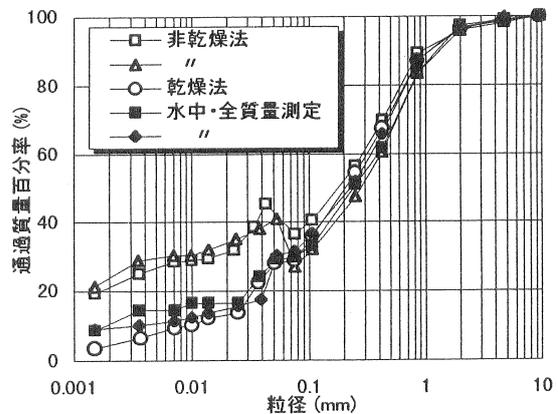


図3 粒度分析結果(試料準備方法と試験方法の影響)

結果を図3に示す。「非乾燥法」では沈降分析による粒度とふるい分けによる粒度が単調な関係で連続しないという矛盾した結果が生じているが、「乾燥法」と「水中・全質量測定法」では、そのような矛盾は生じていないことがわかる。沈降分析は種々の仮定の基で成り立っている方法であるのでこのような矛盾が生じることは珍しくない⁷⁾。ここでは「乾燥法」と「水中・全質量測定法」においてそのような矛盾が生じなかったことを考慮して、この矛盾が生じた理由を次のように考えた。

基準の方法のように、試料の炉乾燥質量(m_{1s}および

m_{2s}) を試験前含水比から推定すると、試料の含水比が不均一の場合正しく推定できない可能性が高い。本研究で対象とした試料は、先に述べたように、不攪乱の状態では含水比の均一性は極めて低い。従って、非乾燥状態において試料の攪拌・練り返しが不十分であると、試験試料の炉乾燥質量を正しく評価できない。すなわち、準備した試料のどの部分から含水比を測定するかによって炉乾燥質量の推定値が大きく異なってしまう。一方、「乾燥法」で行ったように乾燥させて粉々にするによって含水比の均一性が高まるとともに試料の攪拌も容易になり、炉乾燥質量を比較的精度よく推定できたと考えられる。また、乾燥させなくても、「水中・全質量測定法」のように炉乾燥質量をすべて実際に炉乾燥して求めた場合にはそのような質量測定誤差の影響は極めて小さくなる。このような理由から「乾燥法」と「水中・全質量測定法」では先の矛盾が生じなかったと考えられる。

次に、乾燥による細粒分の団粒化（見かけの粗粒化）の影響を考える。本試料では、乾燥させると白と黒の鉱物にまじって、黄土色をした粒状の塊が見られた。この塊は指先ですりつぶすと簡単に壊れるくらい脆く、微細な粉末状になった。機械的な分散や化学的な分散方法が同じ場合、団粒化の影響は乾燥法において最も強く現れると考えられる。実際、図3において「乾燥法」の結果を見ると30 μ m以下の粒径の通過率（含有率）が他の方法で得られた結果より低くなっている。「水中・全質量測定法」によれば、この団粒化の影響を他の方法に比べて容易に避けることができる。

以上のことより、本試料のように含水状態が不均一でかつ細粒分を含み、細粒分が乾燥によって団粒化する場合、「水中・全質量測定法」が有効であると言えよう。

3. 試験方法

一面せん断試験のための供試体作成方法と同試験の方法について述べる。

3.1 供試体作成方法

木箱から、試料を慎重に取り出し、電動式ワイヤーカッターで小ブロックに切断した。小ブロックは、それから1個の供試体を無理なく成形できる程度の大きさである。各小ブロックにパラフィンを厚く塗布し保存した。

飽和度を上げる場合は、針でパラフィンに無数の穴をあけ、水中で真空脱気をした。その結果、調整した供試体の飽和度はすべて94%以上となった（図1(b)）。

試料はカッターリングを押し込めないほど固く、また非常に脆いので、小ブロックから供試体を成形するのは容易でない。そこで次の方法を採用した。

小ブロックのパラフィンをはがし、カッターリングの

内径より1~2mm程度大きめの直径の円柱形に粗削りする。カッターリングに圧密リングを装着した状態で、カッターリングをその刃先部が試料上面にくるように試料に鉛直に載せる。それらの上下を適当な剛板で挟み、一軸圧縮試験機下部加圧板上に載せる。上下の板でリングと試料が固定できるよう、試験機の上下の加圧板の間隔を調整する。下部加圧板を徐々に上昇させつつ、カッターリング刃先の周りをカッターナイフで整形する。このとき試験機の荷重計の読みに注意して試料に過度の力が働かないように注意する。円柱形に整形後、上下端面をカッターナイフで整形する。

この方法によれば試験者の技量に影響されないで供試体の成形が容易にかつ精度よく行える。

成形したせん断試験用供試体の質量、体積、試験後の炉乾燥質量および土粒子密度からせん断試験前の含水比と間隙比および飽和度を算定した（図1）。土粒子密度は、ひとつの供試体内部でも図2に示したような分布特性をもつと考えて先に記した平均値を用いた。

3.2 一面せん断試験の方法

改良型一面せん断試験機を使用して圧密排水せん断の条件で試験した。一部の試験を除いてせん断中の垂直応力は垂直荷重一定の条件、すなわち、圧密・定圧条件で行った。一部の試験（供試体数3）では下に述べる方法でせん断中に垂直荷重を変化させた。

上下のせん断箱の間隔を0.2mmに設定した。圧密は所定の垂直荷重を一回で、または段階的に載荷した。各荷重段階において圧密終了は3t法によって判断した。せん断速度は0.05mm/minで行い、せん断変位は最大8mmとした。

垂直荷重を変化させた試験の方法を述べる。一面せん断試験ではせん断と共に供試体内部のせん断面面積が減少し土のせん断面の一部は上部せん断箱底面の金属に接する。従って、垂直荷重一定で試験すると、土同士のせん断面に作用する真の垂直応力は、平均垂直応力 σ （=載荷荷重÷供試体全断面積）とは異なった値になると考えられる。とくに、ダイレタンスーによって膨張する場合は、真の垂直応力は金属と土の接触部分に比べて大きいと考えられる。最も極端な状態を想定すると垂直荷重のすべてが土と土の接触面に作用する。垂直荷重÷土と土の接触面積= σ^* とおくと、この極端な状態では真の垂直応力は σ^* となる。垂直荷重一定で試験すると σ^* の値はせん断とともに増加する。垂直荷重を制御した試験では、 σ^* がせん断中一定になるように垂直荷重を制御したものである。

垂直荷重を制御した場合、せん断直前の圧密圧力はせん断応力最大時の垂直応力（ σ ）と等しくならないので、以下の考察において、せん断強度に対する圧密時条件（圧密後の間隙比や圧密圧力）の影響を議論する場合にはこの方法で試験した結果を含めない。

本論文では、すべての試験結果に対して垂直応力として平均垂直応力 (σ) を、せん断応力も同様に平均せん断応力 (=せん断力÷供試体全断面積) を用いて整理した。また、せん断強さをせん断応力の最大値で評価した。せん断終了までにせん断応力のピークが出ない場合はせん断終了時におけるせん断応力をもって最大値と見なした。

なお、試験結果を σ^* を用いて整理し考察した結果は別途発表した⁸⁾。 σ^* を用いて整理しても次節で述べる結果と定性的には同じである。

4. 結果と考察

4.1 圧縮特性

一面せん断試験の圧密過程における圧密圧力と間隙比の関係から試料の圧縮特性を調べた。

図 4 は、図 1 (b) に示したすべての供試体の圧密後の間隙比 e_c と圧密圧力 σ_c の関係である。線で結ばれた一連のプロットは垂直荷重を段階的に载荷した試験結果で、線で結ばれていないものは垂直荷重を一回で载荷した試験結果である。圧密後の間隙比の算定において、垂直荷重载荷直後に計測される圧縮量には、いわゆるベディングエラーを含むことが多いので、計測した変位と時間の関係から変位の初期値の補正を行った。段階载荷した場合は第 1 段階の荷重载荷時に初期値を補正した。

図より、同じ圧密圧力であっても間隙比が供試体間で大きく異なっていることがわかる。これは、先に指摘したように、同じブロックから成形された供試体間でも初期間隙比が大きく異なるためである。そこで、 e_c の代わりに、载荷によって生じた初期間隙比からの変化量 $\Delta e (= (e_c - e_0))$ と圧密圧力との関係を用いて圧縮特性を考察する。ここに、 e_0 は初期間隙比である。結果を図 5 に示した。

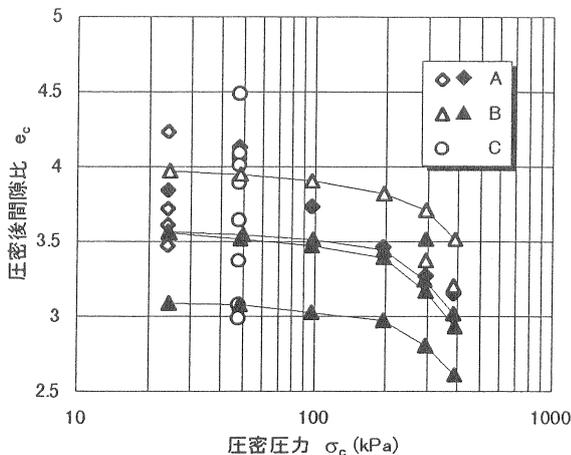


図 4 圧密後間隙比と圧密圧力との関係

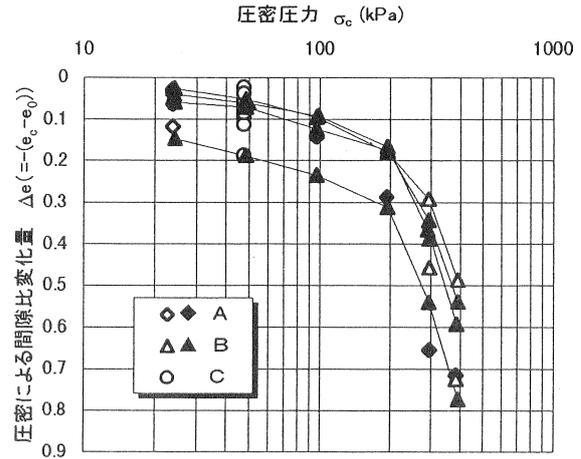


図 5 圧密による間隙比変化量と圧密圧力との関係

図 5 の段階载荷した試験結果より、圧縮性に対する圧密圧力依存性を調べることができる。飽和度調整の有無に依らず圧密圧力 200 kPa 前後で圧縮性が急変していることがわかる。すなわち、 $\sigma_c < 200$ kPa の低応力レベルでは、 $\sigma_c > 200$ kPa の高応力レベルに比べて、間隙比の減少は極めて小さい。よって低応力レベルでは初期の間隙構造がほとんど破壊されずに残っていると考えることができる。一方、高応力域では急激な間隙比減少が起こり初期の構造はもはや破壊されていると思われる。

上記の高・低応力域の境界である 200 kPa という値はいわゆる圧密降伏応力 (p_c) に相当する。試料採取地付近では DMP 層の深度は層底面でも地表面から 7 m 程度と報告されている⁴⁾ので 200 kPa の上載圧を受けていたと考えにくい。つまり、 p_c の値は地盤の地質学的な過圧密履歴を反映しているのではない。むしろ 10 万年というオーダーの堆積期間中に形成された続成作用 (diagenesis) の結果であると思われる。火山灰は続成作用を受けて凝灰岩になる。本試料はまさにその途上にあつて 200 kPa の圧力に耐える構造が形成されていると解釈できる。

ブロック B の段階载荷の結果より圧縮指数 C_c を求めると 1.56~1.86 となった。因みに、乱さない正規圧密粘土に対して C_c と液性限界 w_L の関係を表わす Skempton の経験式を用いて C_c を計算すると 0.95 から 1.2 程度となる (表 1 の w_L の値を用いた)。Skempton の式は堆積性の粘土に対して比較的適用性に優れていることを考慮すると、軽石風化土の圧縮指数は堆積性粘土の圧縮指数の 1.3~1.9 倍大きいと言える。

供試体の初期状態が圧縮性に及ぼす影響を検討するために、初期間隙比と垂直応力载荷による間隙比減少量の関係を調べた (図 6)。初期の構造が保持されるような低垂直応力域、すなわち $\sigma = 24$ と 48 (kPa) のみを対象とした。図より、初期間隙比と間隙比減少量の間には特別の関係が見られないようである。しかし、一般に想像されるような、

初期間隙比が大きいほど空隙比減少量が大きくなるという傾向は見られないことは指摘できる。室内で調整した再圧密粘性土や砂などでは空隙比が大きいほど圧縮性が高いが、この試料ではそのような傾向が見られないことを意味する。むしろ、初期間隙比が2番目に小さいのに空隙減少量が最も大きいというデータもある。

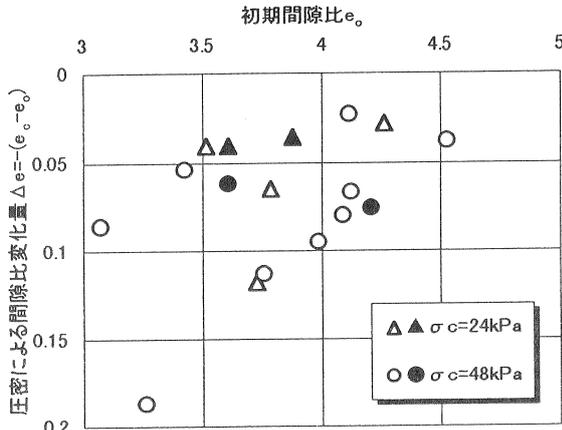


図6 初期間隙比と圧縮性の関係 (低垂直応力)

4.2 セン断変形挙動

代表的な試験結果を用いてせん断変形挙動に対する垂直応力の影響、さらに、低垂直応力下での挙動における初期間隙比の影響について調べる。

図7は同じブロックから成形された供試体 (ブロックA飽和度調整供試体) に対して垂直応力を変えて行った試験結果である。せん断変位に対するせん断応力と垂直変位の関係であり、垂直応力をパラメータにしている。図において垂直変位の正の値は供試体の膨張に、負の値は圧縮に対応する。

低垂直応力下では ($\sigma_c=24, 48 \text{ kPa}$)、せん断初期に極めてわずかに体積圧縮した後体積が膨張に転じている。体積膨張が始まるときにせん断応力がピークを示している。一方、より高い垂直応力の下ではせん断開始から体積は減少を続け、試験したせん断変位の範囲では体積膨張に転じていない。また、体積圧縮量は垂直応力が大きいほど大きくなるようであるが、体積圧縮の量には限界が有りそうに見える。体積が膨張に転じる現象が見られない供試体ではせん断応力にピークが現れていない。

なお、せん断変形挙動における垂直応力の影響は飽和度を調整しなかった供試体においても同様に見られた。

先に圧縮特性の観点から、低垂直応力下では初期の構造が保持されると推察した。したがって低垂直応力の下では、供試体間の初期状態の相違がせん断変形挙動に影響する可能性がある。図8は $\sigma_c=24 \text{ kPa}$ の低垂直応力下における

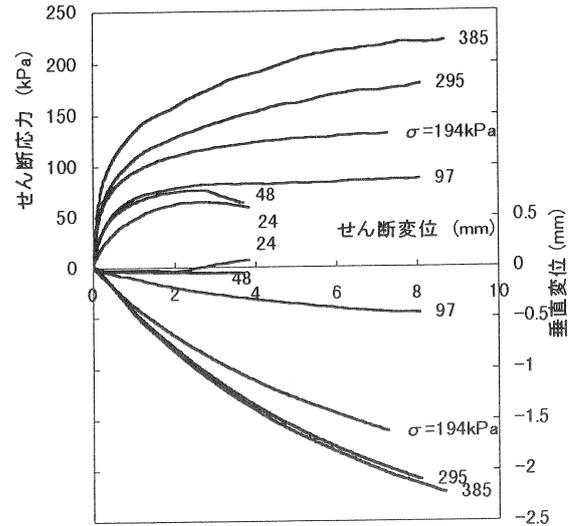


図7 セン断変形挙動における垂直応力の影響 (飽和度調整A試料)

せん断挙動を示したものである。図に示した結果はすべて同じブロックの供試体 (A飽和度無調整) に対する結果である。各供試体の初期状態は、図1(b)にラベルを付したプロットで表わされている。同図の情報を考慮しても、せん断挙動に対する供試体初期状態の影響に関する、特別の傾向を読み取ることができない。

また、A_e1 供試体を除いて、図7で指摘した低応力域でのせん断挙動と矛盾していない。A_e1 供試体は体積が膨張に転じた後もせん断応力は増加しつづけている。同供試体の初期状態は他の供試体と比べて特異でもないので、この挙動も初期状態を表すパラメータ (空隙比、飽和度、含水比) に関連付けることができない。

結局、低垂直応力下でせん断されたときは、供試体の初期状態を反映しているはずではあるが、ここで取り上げ

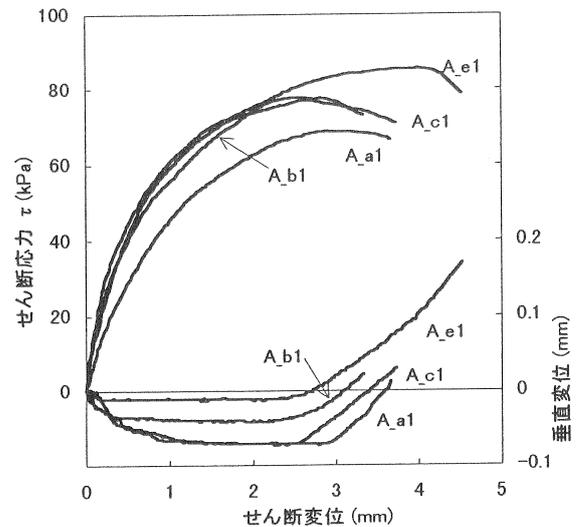


図8 低応力域でのせん断挙動 ($\sigma_c=24 \text{ kPa}$; 飽和度無調整A試料)

た要因 (初期間隙比, 含水比, 飽和度) だけでは説明できない他の要因が関与して各供試体の挙動を支配していると考えられる。

4.3 せん断強度特性

(1) せん断強度と垂直応力

図 9 (a) と (b) に, すべての試験結果から得られた, 最大せん断応力と垂直応力の関係を示す。図 9 (a) は試験した応力域全体での結果で, 同 (b) は (a) の一部を拡大したもので $\sigma < 200 \text{ kPa}$ の範囲の結果のみを示している。図 9 (a) においてブロック B の飽和度調整供試体はせん断中に垂直荷重を変化させたものであるが, これらについては垂直応力はせん断応力が最大のときの値を示している。その他の供試体についてはせん断中垂直荷重を変化させていないので垂直応力はせん断直前の圧密圧力と同じである。

図 9 において, 2 本の直線を引いたが, 一つはせん断強さの下限値と原点を通るもので, 他は $\sigma > 200 \text{ kPa}$ における包絡線である。偶々両直線の傾きが一致しているが, その傾きからせん断抵抗角 ϕ_d を決定すると 26.5° となった。

次に低垂直応力下での強度特性を考察する。図 9 (b) より, 例えば $\sigma = 24$ や 48 kPa におけるような, 同じ垂直応力であっても発揮されるせん断強さは広い範囲でばらついている。このばらつきは供試体ブロックが同じであっても見られる。垂直応力が大きくなるにつれて上述の包絡線に収斂していく。

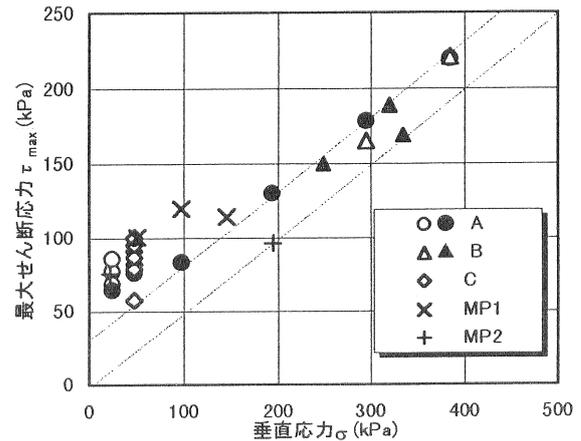
包絡線が直線的になり始めるような垂直応力の値 (約 200 kPa) は圧縮性の急変する応力値であることに注意したい (図 5)。これは粘性土が圧密降伏応力より高い垂直応力の下で, すなわち正規圧密領域で, 一定のせん断抵抗角を発揮するという特性と同じである。

(2) せん断強度と間隙比の関係

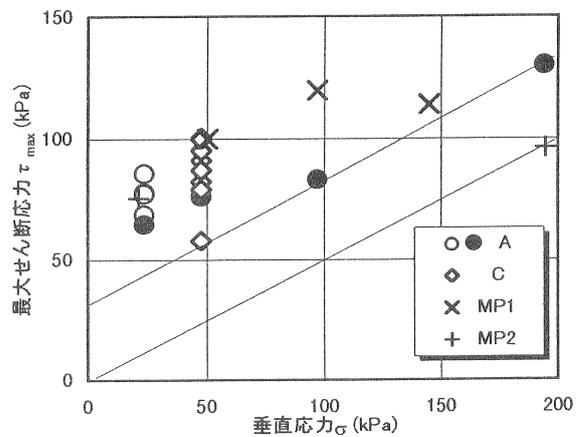
低垂直応力域においては供試体の初期構造が強度に反映していると考えられる。初期構造の因子として間隙比を取り上げ強度と間隙比の関係を調べた。

図 10 (a) および (b) はそれぞれ垂直応力 $\sigma = 24$ および 48 kPa でせん断したときの圧密後間隙比 e_c と最大せん断応力 τ_{\max} の関係である。 $\sigma = 24 \text{ kPa}$ の結果からは定性的な傾向を観察することができないが, $\sigma = 48 \text{ kPa}$ の結果からは, ばらつきはあるが, 間隙比が小さいほど最大せん断応力が大きいという傾向を読み取ることができる。また, 同じ間隙比であれば飽和度を上げた供試体ほどせん断強さは小さくなるようでもある (これは $\sigma = 24 \text{ kPa}$ の結果に対しても言える)。ただし, 図 8 に関連して既に述べたように, 間隙比や飽和度だけでは初期構造に由来する強度を評価できないので, それ以外の因子が影響していると言うに止めざるを得ない。

なお, ここでは圧密後の間隙比を用いて考察したが, この応力域では初期間隙比と圧密後の間隙比の差は微小で



(a) 応力域全体



(b) 低応力域

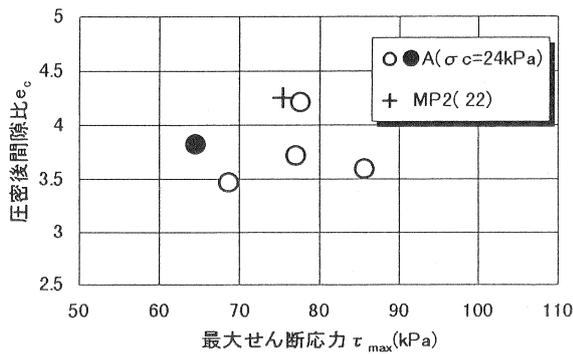
図 9 最大せん断応力と垂直応力の関係

あるので, 初期間隙比を用いた結果も全く同じ傾向である。

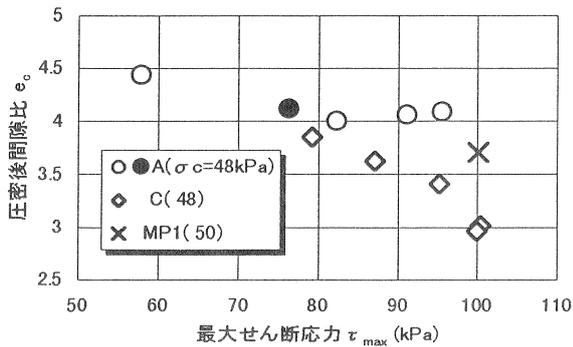
次に, 48 kPa より高い垂直応力域での間隙比と最大せん断応力の関係を調べる。

図 11 に, 97 kPa 以上の同じ垂直応力で複数の供試体を試験した場合の結果に対して, e_c と τ_{\max} の関係を σ をパラメータにして示した。 $\sigma = 194$ と 295 (kPa) で圧密したとき, 間隙比が小さい供試体ほど大きなせん断強さを発揮している。 $\sigma = 385 \text{ kPa}$ の場合は偶々間隙比が同じであったが, せん断強さもほぼ同じになっていて, この傾向に矛盾しない。 $\sigma = 97 \text{ kPa}$ の場合はほぼ同じ間隙比でありながらせん断強さの差が非常に大きい。これより, $\sigma = 97 \text{ kPa}$ での間隙比とせん断強さの関係は, 先に図 10 で議論した低応力レベル ($24, 48 \text{ kPa}$) で見られた関係と同様の特性をもつと考えることができる。

以上より, $\sigma \leq 97 \text{ kPa}$ のような低い垂直応力レベルでは, 間隙比とせん断強さの間には強い相関性が見られないが, これは間隙比以外の初期構造因子がせん断強さに対する支配的要因であるためと考えられる。垂直応力レベルが高く



(a) $\sigma_c = 24$ または 22 kPa



(b) $\sigma_c = 48$ または 50 kPa

図 10 圧密後間隙比と最大せん断応力の関係 (低垂直応力)

なると初期構造の影響度が減少し、圧密後間隙比とせん断強さの間には強い相関性が見られる。応力が本研究で対象としなかったようなさらに高いレベルになると、間隙比そのものも垂直応力によって一義的に決まってしまうと考えられ、せん断強さは垂直応力のみ関数になると予想できる。

5. 結論

大山松江軽石 (DMP) 不攪乱試料に対して一面せん断試験を実施し、結果に対して、物理的性質を表わす諸量との関係に基づいて考察した。主な結論を述べる。

(1) 試料は採取直後には飽和度 90%前後、含水比 120-150%、間隙比 3.5-4.5 であった。採取後 1 年を経過すると飽和度は 70%前後まで低下したが、含水比は依然 90~110% と高い値を示した。これらの量は一つのブロック (15x15x20cm) においても広範囲の値をとり、極めて不均質である。

(2) 本試料のように含水状態が不均一でかつ細粒分を含み、細粒分が乾燥によって団粒化するような土の粒度分析は、炉乾燥質量を実測し水中でふるい分けを行う方法 (「水中・全質量測定法」と呼称した) が有効である。

(3) 一面せん断試験の圧密過程の結果より、試料の圧縮特性を考察した。その結果、試料の初期状態に依らず、約

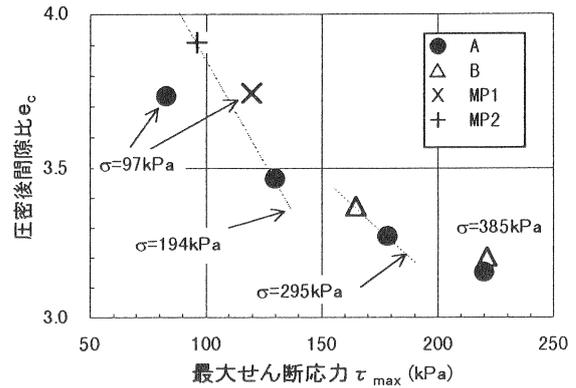


図 11 最大せん断応力と間隙比の関係 ($\sigma \geq 97$ kPa)

200 kPa (圧密降伏応力 p_c) を境として圧縮性が急変した。続成作用 (diagenesis) の結果として p_c 相当圧力に耐える構造が形成されていると解釈した。この試料の圧縮指数は堆積性粘土の圧縮指数の 1.3~1.9 倍大きいと推定した。

(4) 低い垂直応力レベルでのせん断挙動は試料の初期状態を反映していると考え、初期状態を表わす指標として間隙比、飽和度および含水比を取り上げ、せん断挙動に対する影響を調べた。その結果、供試体間でのせん断挙動の相違をそれらの指標で説明できなかった。それらの指標では評価できない初期構造因子がせん断強さに対して支配的であるためと推察した。しかし、初期構造因子を特定するには至っておらず、今後の課題である。

(5) 低垂直応力レベルにおいて間隙比とせん断強さの間には顕著な相関性が見られなかった。高垂直応力レベルではせん断強さと間隙比の間には良好な相関性が見られた。これは垂直応力レベルが高くなるとせん断強さに対する初期構造の影響度が減少し、圧密後の間隙比がせん断強さの支配的要因となったためである。

謝辞

本論文で扱った一面せん断試験および物理的性質に関する試験は、鳥取大学工学部土木工学卒業生羽馬宏信氏 (現大成ロテック (株))、田合昭博氏 (現 (株) 白石) が卒業研究の一部として実施したものである。また、本研究は文部科学省科学研究費 (研究代表者: 清水正喜, 13650463) の助成を受けている。ここに記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) Shimizu, M.: Geotechnical features of volcanic-ash soils in Japan, Special Report B, Proceedings of the International Symposium on Problematic Soils, IS-Tohoku'98, Vol. 2, pp. 907-927, 1998.
- 2) 清水正喜・西田直人・羽馬宏信: 不攪乱軽石風化土の非排水せん断強度特性—初期有効応力と圧密の効果—,

- 第33回地盤工学研究発表会, pp. 667-668, 1998.
- 3) Shimizu, M. & Nishida, N.: Undrained shear strength of undisturbed weathered-pumice soil, *Problematic Soils, Proc. of IS-Tohoku'98, Vol.1*, pp. 169-173, 1998.
- 4) 日本の地質中国地方編集委員会: 日本の地質7, 中国地方, 共立出版, 1987.
- 5) 町田洋・新井房夫: 火山灰アトラス-日本列島とその周辺-, 東京大学出版会, 1992.
- 6) 清水正喜・羽馬宏信・西田直人: 不攪乱火山灰質土の一面せん断試験, 土木学会中国支部研究発表会, pp. 273-274, 1998.
- 7) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説(第一回改訂版), 地盤工学会, 2000.
- 8) 清水正喜・田合昭博: 不攪乱軽石風化土の排水せん断強度特性—一面せん断試験—, 第34回地盤工学研究発表会講演発表集, pp. 693-694, 1999.