

火山灰質土の水分保有特性について

藤 村 尚*

(1979年6月30日受理)

Experimental Studies on the Held-Water of Volcanic Ash Loamy Soils

Hisashi FUJIMURA

(Received June 30, 1979)

Some pF measurements in drying process, e. g. suction plate, pressure membrane, and vacuum desiccator method carried out on volcanic ash loamy soils which are compacted under a moisture content of optimum and a little dry and wet sides of optimum. The results were obtained mainly on the heldwater characteristics in those compacted soils.

First, various methods of the pF measurements are discussed from the point of their influences on the pF value.

In the next, the characteristic relationships between the pF value and moisture content of the compacted volcanic ash loamy soils are presented.

Finally, the properties of shrinkage of those compacted soils are specified by using the pF value.

1. 緒 言

火山の噴火によってもたらされた火山灰が堆積風化し、さらにそれがいろいろな地質の変遷を経て生成される、いわゆる火山灰質土は広くわが国土を覆っている。各地に分布するこの火山灰質土の工学的性質に関する研究は古くから行なわれて、その特性も明確になり多くの研究資料¹⁾が収集分類されている。これらの研究成果はこの種の土の利用と自然災害等の諸問題に大きな効果をあげている。しかし、この火山灰質土は一般に特殊な土とよばれ、その鉱物成分と複雑な構造からその水分の保有性は、他の土質土と一般に異なった特殊性²⁾をもっている。

本研究はその特殊性のうち、とくに水分の保有性について実験的に究明しようとしたものである。水分の保有性は土の構造と関連していること、それはまた強度³⁾に関係する問題であることは勿論である。

このような観点から、本研究においては鳥取県内に広

く分布する大山火山灰質土の代表的なもの^{2, 3}を特に試料として採用した。そしてこの土の鉱物成分とその粒子の作る構造が、締固めによってどのような影響をうけるか、したがってこの土の水分保有性の本質、およびそれと構造変化との関係を明らかにした。

水分の保有性は pF 値の測定によって検討した。まず、この pF 測定試験に採択した方法は吸引法、加圧膜法および蒸気圧法の3種類である。このうち加圧膜法による pF 測定範囲 (pF = 2.0~4.5) では試験法による pF 値の差異がみとめられることから、その原因についての検討が必要である。また従来から用いられてきた遠心法や以前、Croney (1952) らが用いた圧密法を用い、他の試験法と同じ条件を作って、pF 測定を行なった。その得られた結果を他の方法のものといろいろ対比させて、試験法の相違による影響を実験的に検討した。つぎに、締固めた火山灰質土の水分保有特性を花崗岩質マサ土と比較して述べた。また pF については土の構造

* 土木工学科

との関係に注目して、飽和度ならびに乾燥密度との関係から処理して表示した。最後に、土の力学的性質に影響を及ぼすこの土の収縮特性を明示した。

2. 試料の物理的性質

使用した火山灰質土は2種類で、いずれも鳥取県東伯郡西高尾から採取したものであり、これらの試料の物理的性質は Table-I と Fig. 1 に示すとおりである。すなわちローム、黒ボクでは自然含水比、コンシステンシーと有機物含有量にその特徴がみられる。

試料は自然土を空気乾燥して、2.00mmフルイを通過せしめたものである。土粒子比重は試料をあらかじめ乾燥させて磨り潰し、そこから任意に採取した粉末試料について、JIS A1202 にしたがって測定したが、煮沸と減圧による脱気は2~3時間行なった。自然含水比は、一

般にその土の保水特性を示すもので重要であるが本試料土は概して高含水比の傾向を示している。コンシステンシーは試料土を徐々に乾燥させ、その中から任意に採取した試料について JIS A1205, A1206 にしたがって測定した。色調は気乾状態の試料について肉眼視して表現した。火山灰質土の粒子構造は凝集部が多く一般に複雑で、一様で単一な分散を行なうことは容易でない。したがって JIS に定められている方法によって十分な分散効果をあげることはむずかしいと考えられる。本火山灰質土の場合にも土粒子の分散をよくするために適切な前処置と分散剤等の選択が必要になる。⁴⁾ ロームに対しては過酸化水素溶液による前処理とチオ硫酸ナトリウム溶液の分散剤と水酸化ナトリウム溶液の分散剤を添加して土粒子の分散を行なった。なお、本試料土のシルト分と粘土分の合計である 0.074mmフルイ通過分はロームでは

Table I General soil properties of volcanic ash loamy soils

Sample	Specific gravity	Natural water content (%)	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Shrinkage limit (%)	Plastic index (%)	Color	pH		Organic content (%)
								H ₂ O	KCl	
Loam	2.75	70-80	68.3	39.5	23.2	28.8	red brown	6.1	4.6	4.5
Kuroboku	2.41	70-99	99.0	69.0	60.4	30.0	black	4.9	4.4	40.5

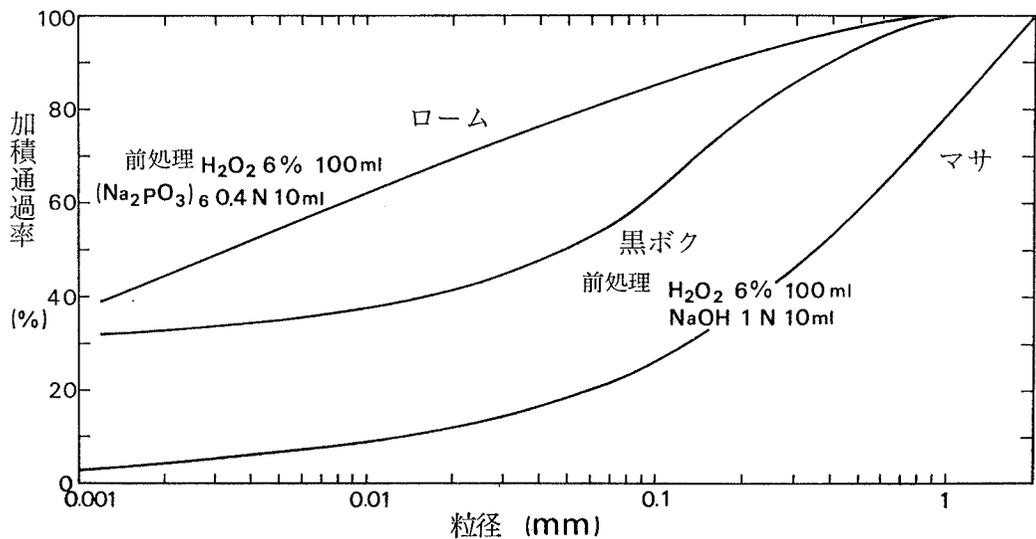


Fig. 1 Grain-size analysis

92%, 黒ボクでは56%である。

つぎに、試料土の化学的性質(試験項目⁴⁾)としてはその物理的ならびに力学的性質に大きい影響を及ぼすと考えられる、有機物含有量とpHとを採り上げることにした。有機物含有量は土質工学会基準にしたがって判定した。

使用した試料の粘土鉱物の判定は2001型X線回折装置によるX線回折と理学電機製標準示差熱天秤装置による示差熱分析によって行なった。この結果含有される主要粘土鉱物はロームではイライト、カオリン鉱物、AI-パーミキュライト様鉱物であり、黒ボクではカオリン鉱物、AI-パーミキュライト様鉱物、アロフェンなどであることが判明した。

なお、これらの火山灰質土と比較検討するために、細粒土分の少ない鳥取県東浜産の花崗岩質マサ土を用いている(Fig. 1)。マサ土試料は比重2.65, 自然含水比7~10%, 白褐色, 主要粘土鉱物はカオリナイト, イライトなどである。

3. pF 測定法とその理論的考察

pFの測定法には、pFの大きさによって種々の方法⁵⁾があるが、本研究では低pF領域(pF≒0~2.5)に対しては吸引法を、pF領域(pF≒2.0~4.5)に対しては加圧膜法(pF=2.5~4.0)、遠心法(pF=2.0~4.2)および圧密法(pF=1.5~4.5)を、また高pF領域(pF≒4.0~7.0)に対しては蒸気圧法を採用した。

吸引法に使用した装置は見取図、Fig. 2に示すように、真空ポンプによって自由水に負圧 P_s (KN/m²)を与え、この負圧状態の水と土中の水をポーラス・ストーンを通して接触させる。平衡時の土中水の負圧は次式によって求められる。

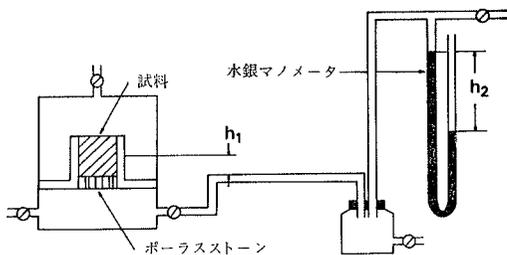


Fig. 2 Suction-plate apparatus

$$P_s = \gamma_w h_1 + r_m h_2 \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 γ_w :水の単位体積重量, r_m :水銀の単位体積重量, h_1, h_2 :同一液体面間の高低差(図示)である。またpFは、 $pF = \log(P_s / \gamma_w)$ として求められる。

加圧膜法に使用した装置は見取図、Fig. 3に示すように、圧縮ポンプによって土中水に圧力を与える。試料室(圧力室)のこの圧力 P はポーラス・ストーンと半透膜(SOIL TEST社, Visking membrane)を境にして大気圧 P_0 下にある自由水と接続することになり、この圧力差($P - P_0$)によって土中水は P_0 側に抽出される。すなわちこの方法は土中水に任意の正水圧を与えて、圧力の低い自由水側に脱水するもので、土中水の吸引力が圧力 P_m (KN/m²)に対応する水分状態で平衡に達する。したがってpFは吸引法の場合と同じように

$$pF = \log\left(\frac{P_m}{\gamma_w}\right) \dots\dots\dots(2)$$

によって求められる。ここに、 γ_w (KN/m²)は水の単位体積重量である。

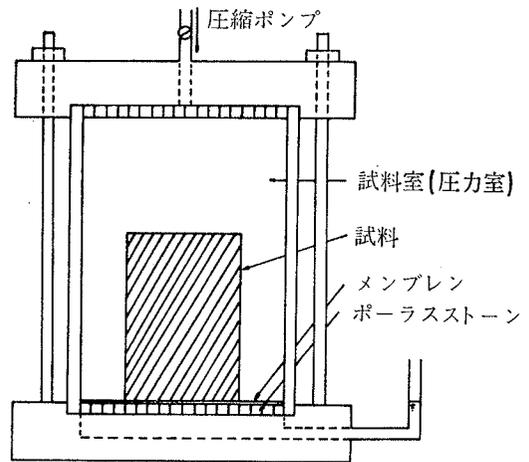


Fig. 3 Pressure membrane apparatus

遠心法に使用した装置は卓上高速遠心機(国産社, H-300)で近似的簡便法である。遠心法によるpFの測定は、重力場における土柱法と同じ原理に基づくものであり、したがってpFは回転数 n (rpm)に応じて、 $pF = 2 \log n + \log r - 4.98$ として求められる。ここに、 r :回転軸から試料中心までの距離である。

圧密法に使用した装置は JIS A 1217 の標準圧密試験機である。圧密試験の載荷過程において、土中のサクシオン圧は加えられた圧密圧力 P_c と平衡を保つから等温条件の下で失われた土中水の Gibbs の自由エネルギーは次式で与えられる。

$$dG = V \cdot dP_c \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 G ：単位質量当りの Gibbs の自由エネルギー、 V ：比体積である。したがって圧密圧力 P_c を gf/cm^2 で表わして対数表示すれば、 $\log P_c$ は pF に対応する。

蒸気圧法に使用した装置の見取図を Fig. 4 に示す。測定に際しては試料を小型シャーレに入れて容器内に静置し、真空ポンプによって容器内を約 5~10mmHg 程度に減圧して土中の水が容器内の水蒸気圧と平衡するまで放置した。蒸気圧法⁶⁾の pF は $pF = \log \{- (LT/Mg_n) \cdot \log_e (H/100) \}$ として求められる。ここに、 L ：気体定数、 T ：絶対温度、 M ：水蒸気の分子量、 g_n ：重力の加速度、 H ：湿度である。なお、本実験では $T=293^\circ K$ であり、一定の蒸気圧をつくる溶液として濃度の異なる硫酸溶液を用いた。湿度はほとんど容器中に電気式湿度計をセットして測定するようにした。

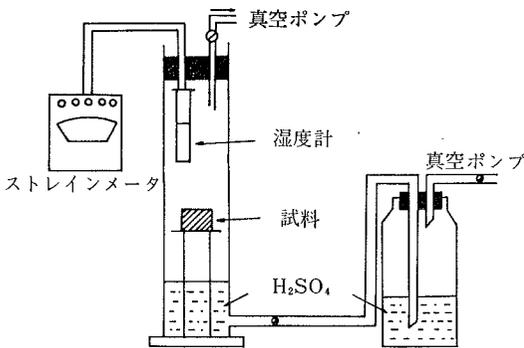


Fig. 4 Vacuum decicator apparatus

4. 供試体の作製

pF 測定用供試体は総て締固めた供試体とする。供試体の作製に際し、締固めは、Fig. 1 に示す試料を直径 18.6mm、高さ 25.1mm の大きさの pF 測定用モールドに入れ質量 600g のランマーを 140mm 高さから自由落下させて 2 層 10 回で行なった。試料を空気乾燥した後、加水する湿潤過程で得られた締固め試験結果は Fig. 5 に示すとおりである。これらの結果を基にして、各試料につい

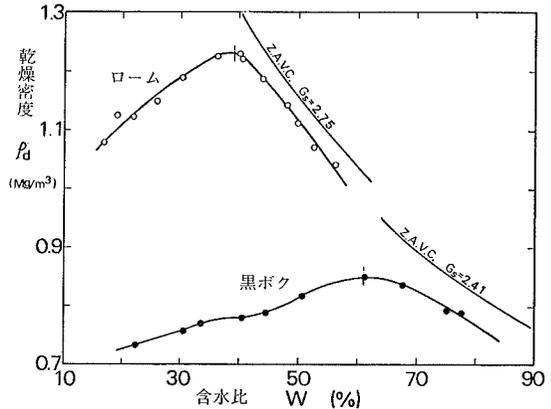


Fig. 5 Water-dry density relationship

て 3 種類の締固め含水比を求めた。すなわち試料は、最適含水比に近いもの D_0 とそれより乾燥側のもの D_d および湿潤側のもの D_w の 3 種で、乾燥側と湿潤側試料は等しい乾燥密度をもつようになっている。

各締固め含水比において締固めた供試体は pF 測定用モールドに入れた状態で吸水飽和させた後、圧密法および遠心法を除いた pF 測定試験に用いた。圧密法に用いた供試体は、含水比の調整を行なった試料を標準圧密リングに入れ、前述と等しい締固め効果を与えて締固め、高さ 20mm に作製したものである。また遠心法に用いた供試体も同じようにして直径 30mm、高さ 20mm の大きさに締固めて作製した。また供試体の寸法が変化しないように側面および上、下面を拘束して吸水飽和させ、その後圧密法および遠心法による pF 測定に用いた。

5. 土中水の種類

土の保水能は土質によって変わるから、一般的に公認された土の水分の分類方法はないが、本論文においては、一応 pF 値との対応をも併せて次のように考えた。重力水 ($pF=0\sim 1.8$)、毛管水 ($pF=1.8\sim 4.2$)、吸着水 ($pF=4.2\sim 7.0$)、なお遠心含水当量 (重力の 1000 倍の遠心力の場合) は $pF=2.7$ 、吸湿水分 (Hygroscopic moisture content) は $pF=5.5\sim 7.0$ である。これら pF 値は研究者によって多少の相違はあるが著者らはおおよそ妥当なものと考えている⁷⁾。

6. 測定法に関する考察

6.1 吸引法

吸引法には水頭型と減圧型の2つがある。本実験では、 pF 3.0 まで測定可能であるが、ここで用いたポーキサイド製ポーラス・ストーンでは pF 0~2.3 の範囲が測定可能であり、 pF 2.3 以上は空気もれなどのために測定できなかった。Fig. 2 に示したガラス管のメニスカスを読みとれば任意の pF 値に対するその時の含水比が連続して推定できる。実験の結果が精度上好ましくなかったため、個々の供試体から pF と含水比を直接測定した。なお、この種の実験は浸透圧の問題が生じるが、試料の化学的条件等を考え合せ本実験の場合はほとんど無視してさしつかえないものと考えた。

6.2 加圧膜法

加圧膜法^{9),10)}は Richard L. A. によって考案されたもので、その後 Road Research Laboratory 等で改善された装置である。本実験では手持ちの圧縮ポンプの容量が小さいために pF 2.5~4.0 の範囲しか測定できなかったが、ポンプ容量を大きくし、またガスの種類を変えることによってさらに広範囲の pF 測定が可能となる。このようにこの方法は測定範囲が広く一貫した pF 値を定量的に測定できるものとして期待される。

この方法では水分平衡状態に達するまでの時間を調べておく必要がある。Fig. 6 に加圧平衡下の水分平衡と加圧時間の関係の一例を示した。ローム試料の場合、加圧後 24時間経過してもなお水分の減少がみられ、ほぼ 150時間後に平衡状態に達することがみとめられた。この脱水曲線からも、本火山灰質土およびマサ土の水分平衡状態は加圧後約 6日経過して達せられるものとみなすことができた。

6.3 蒸気圧法

蒸気圧法では平衡水分に達するまでの経過時間は求めようとする pF 値によって異なるが、約 5~10 日である。そこで本実験では硫酸の疲労を考慮するとともに時間の短縮を図るため、供試体をあらかじめ乾燥剤を入れた容器中に入れるかあるいは相対湿度 50%、温度 20°C の室内に放置して乾燥させた後、Fig. 4 の容器内に静置する。この方法では温度効果が測定精度に影響を与えるので恒温状態になるよう極力努めた。

6.4 遠心法

pF -含水比関係の測定に遠心力を用いる方法は迅速性、供試体の装作が簡単であることなどからわが国では古くから広く用いられている。しかし、遠心法に対しては遠心力による空けき率の変化や試料土の表面にたまる水の不完全除去など、まだ残された問題点がある。本実

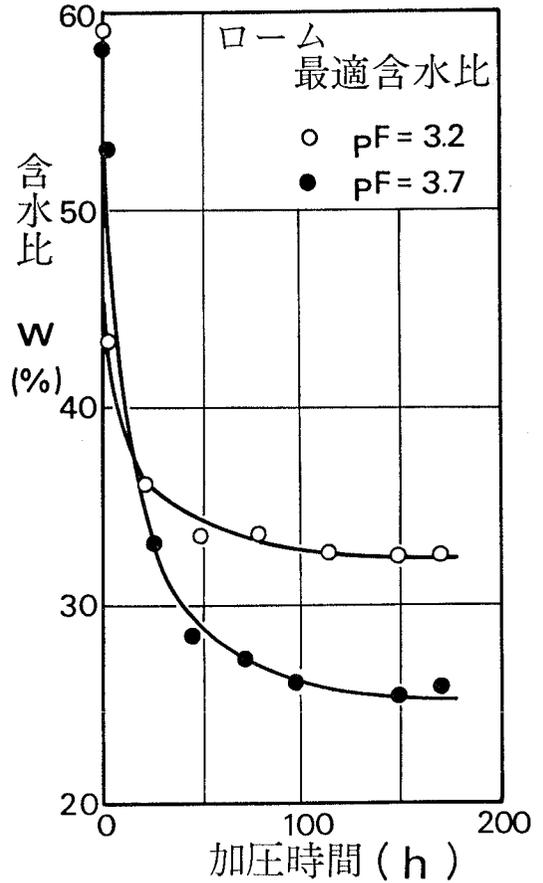


Fig. 6 Relationships between water content w and pressured time in pressure membrane test

験においては、この遠心法と加圧膜法とを比較することも重要であると考え、これらの結果を比較研究することにした。遠心法では試料土の厚さ、回転半径、回転速度および回転時間によって pF ・水分特性が異なることが予想されたので、実験の遠心諸元は試料土の厚さを 20 mm、回転半径を 6.5mm、回転速度を 2000~16000rpm、また所定の回転数に達するまでの時間を 5~10分とした。回転時間は Fig. 7 にその一例を示したが、ロームならびに花崗岩質サマ土⁹⁾の場合、平衡状態に達するまでの時間は約 2時間であった。このような実験的事実から試料土の含水比は、均一遠心脱水時間を 2時間とすべてその後に測定するようにした。なお、回転時間は土の種類によって異なることに注意する必要があることは勿論である。

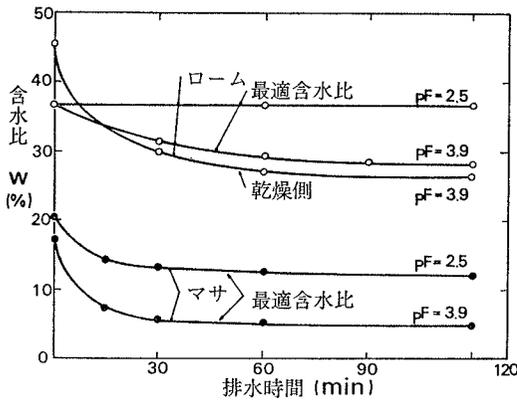


Fig. 7 Relationships between water content w and centrifuged time in centrifuge test

遠心法は Briggs 氏 (1907) が提唱して以来この方法に関する欠点も指摘され、それらに関する理論的、実証的検討^{10,11)}もなされてきた。したがって現在では装置および理論もほぼ確立されつつあるが、締固めた火山灰質土に対してこの方法が適切であるかどうかは後述のように研究の余地が残る。本研究では遠心法に関して従来から指摘されている問題点も併せ考え、主に吸引法および加圧膜法による試験結果を基に、これらを比較検討することにした。

遠心法により得られたロームおよび黒ボクの締固め試料の pF -含水比曲線の一列を Fig. 8 に示す。これら実験曲線が示す傾向を観察すると、ロームの場合に遠心法による含水比と吸引法および加圧膜法による含水比とは、 $pF = 2.0 \sim 3.0$ の範囲において相当の相違を示し、遠心法によるものの方が吸引法によるものより約10%小さくなっている。この傾向は初期含水比の小さい試料（乾燥側試料）ほど大きい。またこの傾向は $pF = 3.6$ 以上のとき急減している。

黒ボクの場合にも上述と同じ傾向がみられた。この場合 $pF = 3.3$ 以上の範囲では両者による実験結果はよく一致している。また初期含水比の大きい試料（湿潤側試料）については低 pF 範囲でも両者間の差異はほとんどみとめられなかった。このように遠心法によって得られた結果と吸引法および加圧膜法によって得られた結果とはかならずしも一致せず、とくに低 pF 値において両者の差は著しく大きい。また試料の種類によっても両者の対応性が悪くなっていく。

以下、このような pF -含水比曲線の不一致について

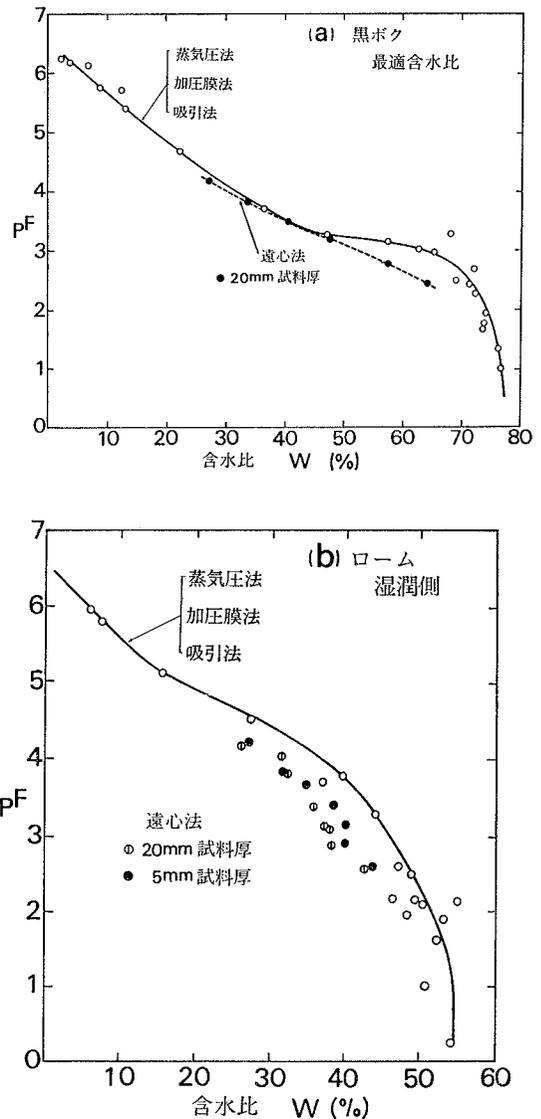


Fig. 8 Different pF -water content curves by centrifuge method and pressure membrane method

考察を行なってみよう。まず遠心力によって試料に加わる圧力の影響について考えてみると、たとえば試料の密度が $2.0 \text{ } 9.8 \text{ kN/m}^3$ 、高さが 2 cm である試料の中心には遠心力が 5000 gn の力では試料に加わる圧力は $10000 \text{ } 98 \text{ kN/m}^2$ となり非常に大きい、この圧力働土粒子から土中水にも伝達され計算式から算出される圧力より大きい圧力が土中水に生ずるものと考えられる。

またこの圧力は試料の密度と高さ、すなわち平均回転半径に関係することは理論の示すとおりである。現在、遠心法による試料高の規準はないが、試料高の相違が圧力に与える実質的影響を調べるために、試料高5mmと20mm¹¹⁾の2種類のローム試料について実験を行なった。いまその測定結果の一例を示すと Fig. 8 (b) のようであり、吸引法および加圧膜法で得られた結果を基準にとれば、同一 pF に対する試料厚 5mm の含水比は試料厚 20mm のものより近い値を示している。このような差異は試料中心より下部の土の圧縮性によるものであろう。つぎに遠心機の高速回転による温度上昇は低速回転（回転数 2000rpm）の場合の 20°C から高速回転（回転数 15000 rpm）の場合の 40°C の範囲であった。この結果を Road Research Laboratory¹²⁾ が示した pF-温度の関係に適用すれば pF 値に及ぼす温度の影響は無視できる程度である。

6.5 圧密法

圧密試験結果を用いて圧密圧力の対数と含水比の関係を示すと Fig. 9 のようで、土の種類および締固め含水比等によって吸引法、圧力膜法で得られた水分特性と異なっている。このことに関して、圧密は容積の圧縮を行ない、土構造を変えてしまうものであるし、水分飽和の状態を常に保たしめるものであるから、他の方法とその排水過程が異なっていて、したがって圧密による pF 測定ということは理論的にも他のものと相違している。しかし圧密法の pF への適用は Fig. 9 (b) に示されるようにごく限られた範囲での圧密圧力と飽和状態にある試料については可能であろうと考えている。これに関しては今後の問題としてさらに検討を行ないたい。

以上の各種 pF 測定試験結果に基づいて、土の構造を破壊せずに各試料の水分特性を明確に把握できる方法として吸引法、圧力膜法および蒸気圧法の 3 方法を採用した。

7. pF・水分特性

pF 試験に用いた土は黒ボク、ロームとマサ土である。締固めは空気乾燥試料を所定の含水比に調整し一定

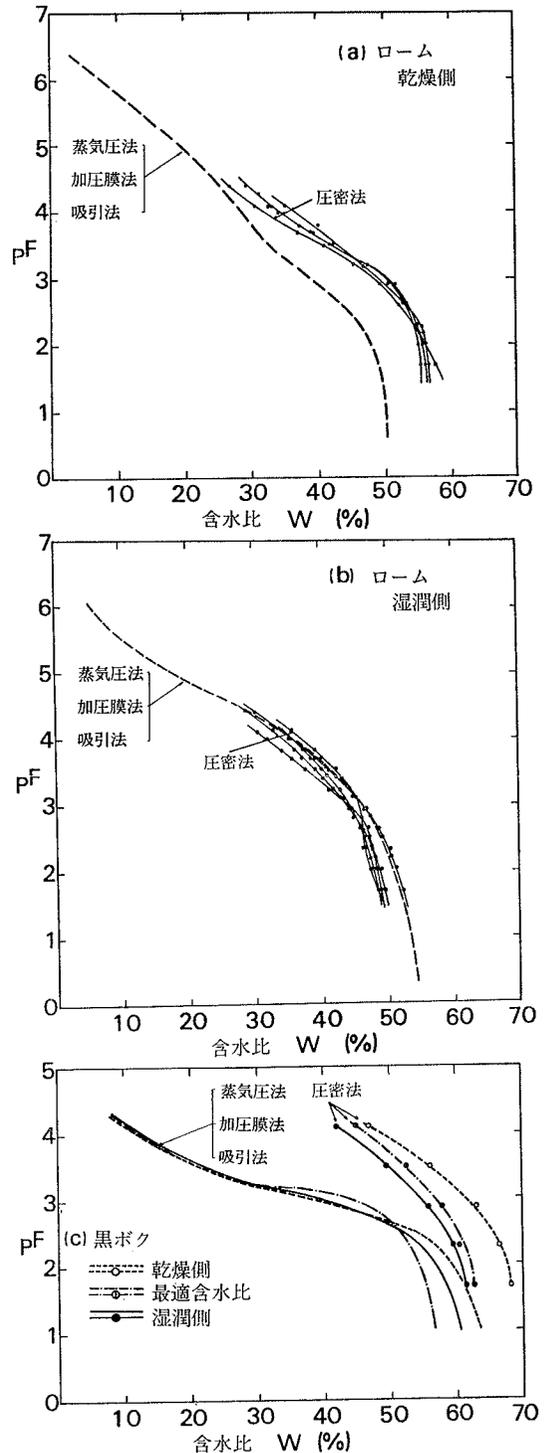


Fig. 9 Different pF-water content curves obtained by consolidation method and pressure membrane method

の締固め効果を与えて行なった。この供試体をサクシオン値が0の状態（飽和状態）に湿らせた後、吸引法、加圧膜法および蒸気圧法のいずれかの方法によって土中水を次第に抽出していく乾燥過程法によって、その各過程段階における pF 値と含水比を測定した。これらの pF-含水比試験結果は Fig. 10 に示すとおりである。同図には、自然含水比が約80%の自然試料のロームと、ローム試料 D_d を制御しながら吸水せしめて作った膨潤抑制試料とを用いて試験し、これらの pF-含水比曲線と、別に締固めたマサ土について行なった同じ試験曲線とを比較のために図示している。

等しい締固め効果を与えて作った2つの試料、すな

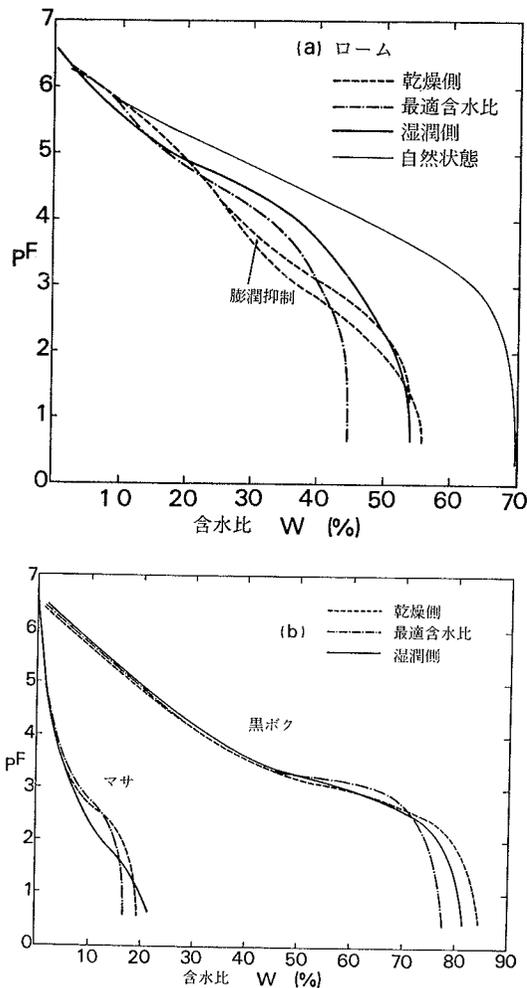


Fig. 10 Influence of pF-water content curves by molding water content

わち空気乾燥の試料と自然含水比の試料から得られた pF-含水比曲線を比較してみると、含水比が等しいときの pF 値は自然含水比試料の方が空気乾燥のものより高い。¹³⁾このことは火山灰質土に含まれる有機物や高活性を有するアロフェンの特質によるものと思われるが、¹⁴⁾また一般に乾燥によって吸着水を失って非活性化し、水の吸着性を失うことにもよる。

土は吸水することによって土中水の自由エネルギーを増加するが、その一部は膨潤のために失われる。¹⁵⁾ D_d の膨潤を許した試料と膨潤抑制試料の pF-含水比曲線から pF 値が $1.5 \leq pF < 4.2$ の範囲においては膨潤抑制試料の方が含水比が等しいときの pF 値は高く、約 $pF = 4.2$ で両曲線は一致している (Fig. 10 (a))。この範囲内にある土中水のエネルギーは乾燥密度の値に関連しているようである。

締固め土の pF-含水比曲線は固体、液体、気体各相の含有割合や状態を把握するのに有効な指標である。

Russell, Mickle¹⁶⁾らは pF-含水比の曲線を液性限界、塑性限界および塑性指数と関連させて、3つの領域に分けている。本実験では試料の pF-含水比曲線は火山灰質土および非火山灰質土のどちらの場合にも反向心複心曲線を示す傾向があり、変曲点を中心としたつぎの3つの領域に区分できる。1つは含水比変化に対する pF の増分が小さくだいたい直線的で、その間に変曲点を含んだ中央領域である。2つはこの領域の両側において、pF の増分が大きく現われる領域である。なお、これらの領域の境界は一般に明確ではないが、ここでは2つの最大曲率点を境界と考えた。

次に火山灰質土とマサ土を圧縮性の大きい土と小さい土の観点から保有水分特性を考察する。

まず、火山灰質土とマサ土の pF-含水比曲線を比較してみると火山灰質土の方がマサ土に比べて保有水量が極端に大きいことがわかる (Fig. 10 (b))。これは、火山灰質土がマサ土に比べて細粒子が非常に多いため分散構造がよく発達し、¹⁷⁾比表面積が大きく、間げき分布も異なるためであろう (Fig. 1 参照)。一方砂粒子は土粒子表面が比較的安定しているので水分子を双極子の形で拘束する力は非常に弱いものと思われる。このことからマサ土の間げきを占める水には低圧力で排水される自由水の割合が多く、火山灰質土中の水は自由水の他に毛管水、吸着水等がかなり含まれていることが推定されよう。

締固めた3種類のマサ土試料の飽和含水比の相違は、

それぞれ初期的構造が同一でないために起るものである。初期飽和せしめたこれら試料に除々にサクシオン圧を加えて、いわゆる乾燥抽出過程実験を行なう。実験の結果は、pF 値が約 2.5 に達するまでの過程においては、 D_d 、 D_o では含水比の減少が小さい。pF = 2.5 ~ 4.2 の段階になると含水比の減少が大きくなり、試料は外観上ほとんど乾燥しているような状態になる。また各試料の pF-含水比曲線は、サクシオン圧の小さい間は個々の形を描くが、pF = 3.3 以上ではこれらがよく一致するのがみられる。比較的湿った試料 D_w の pF-含水比曲線は前二者と違って pF 値が 2.5 に達するまでの過程において含水比の減少が大きく、pF = 2.5 以上の過程では含水比の減少が小さい。

締固めた3種類のローム試料の実験結果 (Fig.10(a)) は pF 値が約 2.0 に達するまでの過程においては、 D_o 、 D_w では含水比の減少は小さく、わずかに2~3%である。pF=2.0~5.0 の段階になると徐々に含水比の減少が大きくなる。これらの曲線の変曲点は高サクシオン範囲 (pF≒5.2) にあるが、 D_d ではそれらより低いサクシオン範囲 (pF≒3.7) にある。 D_d の pF-含水比曲線は pF = 0 ~ 2.0 の段階では前二者と同様含水比の減少はほとんどない。変曲点を中心とする pF = 2.0 ~ 4.2 の段階になると含水比の減少が大きくなる。また各試料の pF-含水比曲線は、サクシオン圧が大きい領域でも同一でなく、pF ≒ 4.2 以上では個々の形を描いている。

黒ボク試料の pF-含水比曲線の特徴は pF が 2.5 ~ 3.3 の段階においては、含水比の減少が大きく、その間の pF 値の増加は少ない。また pF が 3.3 以上になると、含水比は pF 値の増加に逆比例して減少する。一方、 D_d 、 D_o 、 D_w の各試料の pF-含水比曲線は、サクシオン圧の全段階においてほとんど差異がみられない。

サクシオンの値は、同一試料では飽和度、乾燥密度、粒子構造、含水比などによって相互に影響を受けているものと考えられる。ここでは乾燥密度を採りあげ、乾燥密度がサクシオン値に及ぼす影響について調べる。

ローム試料 D_o の pF-含水比曲線は、Fig. 11 に示すように pF 値が 3.5 に達するまでの過程においては、初期乾燥密度が異なれば同一 pF 値に対する含水比も相違し、密度が大きいほど含水比は小さい。Olson¹⁸⁾ らによって乾燥密度や間げき比はサクシオン値に影響しないと報告されているが、同図の実験結果から判断すると乾燥密度の影響は無視できないことが明らかとなった。

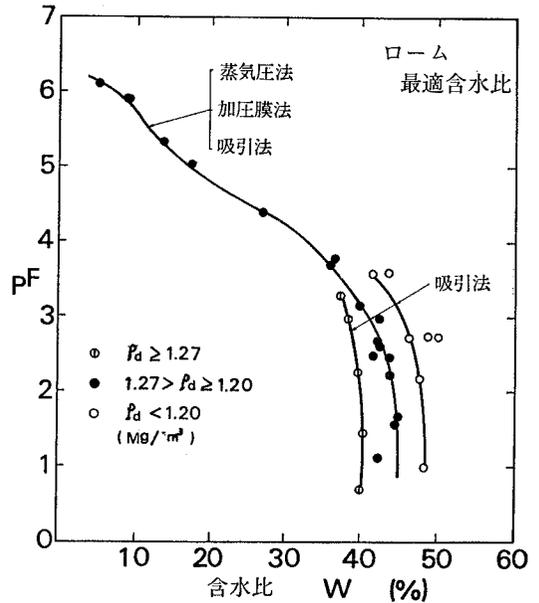


Fig. 11 Influence of pF-water content curves by dry density

次に pF が 0 ~ 7 の全段階を対象とする場合の乾燥過程の pF 測定中には、土中水の排水に伴って試料の体積は減少し、乾燥密度が増加するが、現在の測定法では体積を一定にして全 pF 範囲を測定するのはむずかしい。したがって、乾燥密度などを考慮した pF-含水比曲線を調べておく必要がある。いま、非粘土鉱物が支配的な試料の場合には、pF は飽和度 S_r と pF 測定後の乾燥密度 ρ_d との関数であると考え、これら3者の関係は次式で表わされるものと仮定する。

$$pF = a \cdot \rho_d + b \cdot S_r + C \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 a 、 b 、 c は回帰係数である。黒ボクとロームの各締固め試料について測定範囲内における pF ($0 \leq pF \leq 7$)、 ρ_d 、 S_r の3つの変数間の回帰方程式を図示すると Fig. 12 のようになり、回帰係数 a 、 b 、 c は Table II に示すとおりである。平面回帰分析結果によると締固めた火山灰質土のサクシオンは乾燥密度より飽和度の方が統計的に重要であることが理解されるが、Fig. 11 にみられたように乾燥密度の影響も無視できない。また各締固め試料の回帰平面は明瞭な差異がみられなかったが、これらの平面を用いて乾燥密度や飽和度の変化が実験範囲内にあり、乾燥密度や飽和度の変化した結果が判るとサクシオン値の変化を予想することができよ

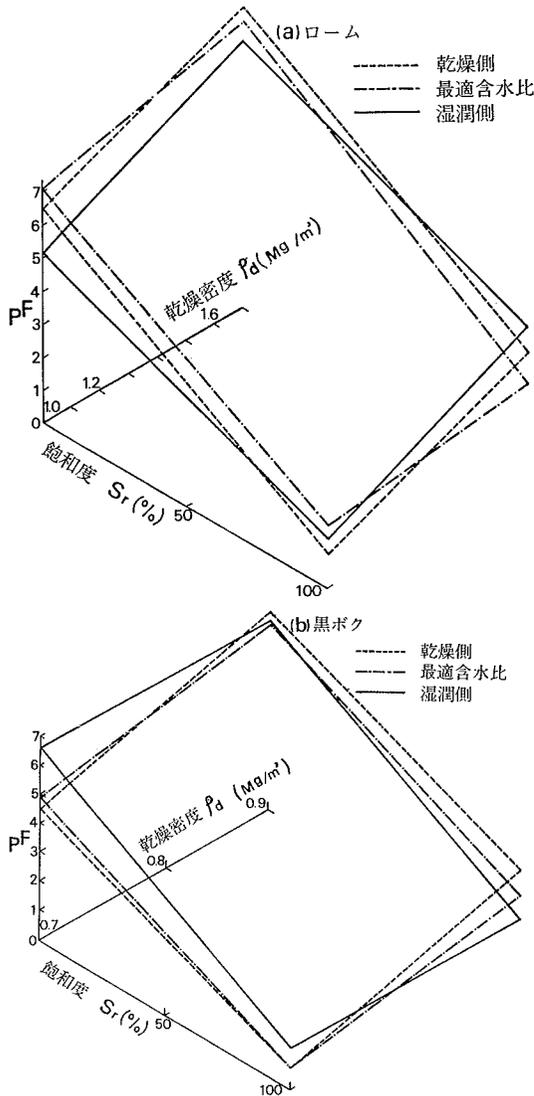


Fig. 12 Relationships between pF, saturation s_r , and dry density ρ_d

う。なお、(4)式に対する F 検定を行なった結果の一例を示すと、ローム試料 D_d の場合34本の試料について有意水準5%で行なった F_{31} (0.005) の値は259.2であり、他の試料の検定結果と同様、回帰方程式は有意である。

8. 収縮特性

Fig. 13 (a)は $40 \times 40 \times 40$ mm の立方体に締固めた黒ボクの D_d , D_o , D_w 試料の締固め→吸水→乾燥→再吸

Table II Regression coefficient, a, b, c

Sample	Regression coefficient		
	a	b	c
Kuroboku : D_d	11.289	-0.037	-3.441
Kuroboku : D_o	7.179	-0.041	-0.190
Kuroboku : D_w	-0.561	-0.051	6.920
Loam : D_d	3.672	-0.054	2.756
Loam : D_o	1.099	-0.051	5.900
Loam : D_w	4.109	-0.036	0.967

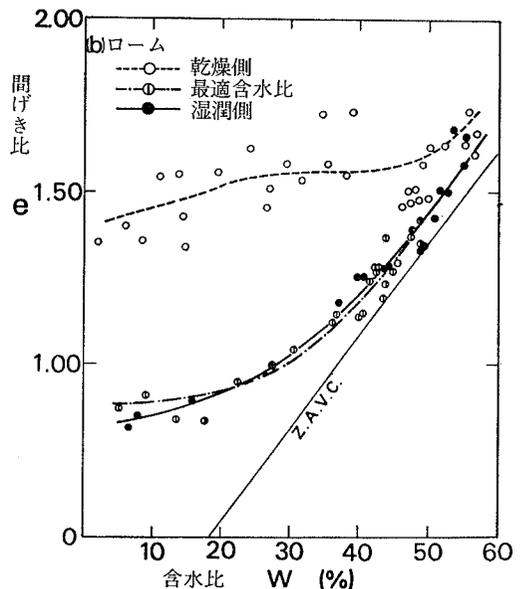
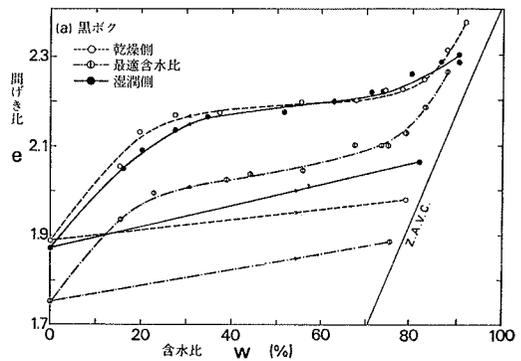


Fig. 13 Influence of shrinkage curves by mold water content

水の過程を、含水比と間げき比の関係で示したものである。Fig. 13 (b)はローム試料の場合の含水比と間げき比の関係を示したものである。Fig. 14 は前図の結果に基づいた本試料の収縮曲線の代表的な一般図である。図中の実線は本試料に最もよくみられた収縮曲線であり、黒

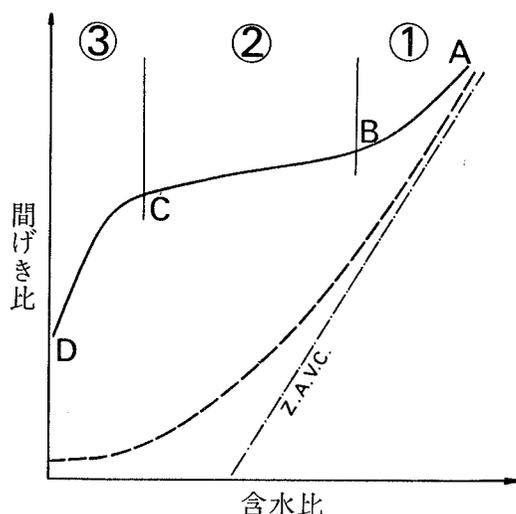


Fig. 14 A illustrated chart of general shrinkage curve in the volcanic ash loamy soils

ボク的全試料とロームの D_d にみられる。①の領域では乾燥によってアグリゲート間の間げきから排水が始まり、アグリゲートはこれらの間げきに生じたメニスカスの曲率の変化により互いに引き寄せられた結果、アグリゲートの再配列が起り、体積の収縮を生じる。①の領域の収縮挙動は正規収縮に類似しているが完全なものでない。この領域に対応する pF を含水比を媒介として pF -含水比曲線を求めると、黒ボクでは pF が約 $0 \sim 2.0$ にあり、脱水される水はいわゆる重力水と毛管水の一部に相当する。この領域の収縮量は全収縮量の約30%を占めている。さらに乾燥が進んだ場合、アグリゲートの接近と再配列は制限され、図中のB点で示される。したがってB点の値はアグリゲート間の間げきの大きさに左右され、大きい間げきを有する大きいアグリゲートでは低サクシオン値に、小さい間げきを有する小さいアグリゲートでは高いサクシオン値にある。②の領域ではアグリゲートを互いに引き寄せる力が毛管力をうまわり、②の領域は体積の減少量は脱水量よりも少なく、いわゆる構造収縮に相当する。この領域に対応する pF は黒ボクでは約 $2.0 \sim 4.5$ にあり、脱水される水は毛管水と吸着水

の一部である。この領域の収縮量は全収縮量の約10%にすぎない。③の領域における体積減少はそのほとんどがアグリゲート内からの排水によるものと考えられる。③の領域の収縮量は全収縮量の約50%もの多くを占めている。

一方、Fig. 14 の一点鎖線は Yong・Warkentin¹⁹⁾ が示した飽和粘土やクラム (crumb) 構造の発達した収縮曲線であり、ローム試料 D_o , D_w にみられる。この収縮曲線は含水比の減少に伴って飽和直線に沿って平行に収縮し、さらに乾燥が進むと収縮に比べて含水比の減少が大きくなることを示している。これらの試料においては、残留収縮に比べて正規収縮が卓越し、この収縮が進行中にはアグリゲートの再配列が起っているものと思われる。

さらに全試料における収縮曲線と pF -含水比曲線の最大変曲点の含水比がほぼ等しい値を示している。このことから乾燥収縮はサクシオンに大いに影響を受けていることを示唆している。²⁰⁾

9. 結 語

火山灰質土を用いて締固め含水比の異なる試料を作り、それらについて乾燥過程 pF 測定試験を行なった。その結果に基づいて、(1)測定法の相違からもたらされる pF 値の検討 (2) 火山灰質土の pF -含水比曲線の特徴 (3) 火山灰質土の収縮特性と pF 値の関連性等について研究した。その概略は次のようである。

(1) 火山灰質土の pF 測定試験に際し、測定法の選択とその操作に当っては十分に注意する必要がある。特に pF $2.0 \sim 4.5$ の範囲では加圧膜法、遠心法、圧密法のような測定法の相違によって、また土の構成成分と構造によって pF ・含水比曲線が非常に異なる。

(2) pF ・含水比曲線は、締固めた火山灰質土およびマサ土の区別なく、おおむね反向形複心曲線に現われる。その変曲点の位置はその土の構造や鉱物成分に関係しているようである。

(3) pF と乾燥密度と飽和度の関係は (4)式の回帰平面で表わされる。

(4)締固め土の収縮曲線は Fig. 14 のように飽和粘土のような、比較的確かな構造の土のものと形状を異にし3つの領域に区分できる2種類に分類される。上記(2)の結果を対照すれば、 pF ・含水比曲線と収縮曲線の形状が対応し、特にどの試料においても Fig. 14 に示したような点B、Cにおける含水比が pF ・含水比曲線の両

最大曲率点のものとはほぼ一致していることがみとめられる。

最後に本研究を遂行するにあたっては、福山大学工学部の久保田敬一教授に多大の御助言を賜った。また、実験にあたっては、当時の学生吉田誠（現在日本開発コンサルタント）、池永哲夫（現在鴻池組）、上木弘毅（現在熊谷組）の各氏に全面的な助力を得た。以上付して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) たとえば、土質工学会編：日本の特殊土，昭49，pp. 21~83
- 2) 鈴木敦己：有機質火山灰土の工学的性質に対する土中水の影響，土質工学論文報告集，Vol. 12, No. 3, 昭47, pp. 75~85
- 3) 久保田敬一・藤村尚：土のサクシオン圧と強さに関する研究，土木学会第28回年次学術講演会講演集，昭48, pp. 278~279
- 4) 久保田敬一・藤村尚：黒ボクの安定処理に関する実験報告，土と基礎，Vol. 25, No. 1, 昭52, pp. 25~30
- 5) たとえば，土壤物理性測定法委員会編：土壤物理性測定法，昭50, pp. 123~159
- 6) Croney, D. and Coleman, J.D., (1952) : "The suction of moisture held in soil and other porous materials," Road Research technical paper No. 24, Her Majesty's Stationery Office, London, pp. 29-31.
- 7) 久保田敬一：浸透水と土の安定，山海堂，昭 41, pp. 1~12
- 8) Coleman, J. D. and Marsh, A. D., (1956) : "An investigation of the pressure-membrane method for measuring the suction," Journal of Soil Science, Vol. 12, No. 2, pp. 343-362.
- 9) 藤村尚・勝見雅・上木弘毅：マサ土の水分保有特性について，土木学会第31回年次学術講演会講演集，昭52, pp. 18~19
- 10) Rusell, M. B. and Richards, L. A., (1938) : "The determination of soil moisture energy by centrifugation," Journal Paper No. J590 of the Iowa Agricultural Experiment Station, Ames, Iowa, Project No. 487, pp. 65-69.
- 11) たとえば，岩田進干：遠心法による pF 測定について，日本土壤肥科学雑誌，第39巻，第3号，昭43, pp. 177~178
- 12) R R L, (1952) : "Soil mechanics for road engineers," Her Majesty's Stationery Office, London, pp. 323-324.
- 13) 堤聰・足立忠司・竹中肇：乾燥条件よりみた有機質土の理工学的性質の変化，農業土木学会論文集，第71号，昭52, pp. 8~15
- 14) 竹中肇：火山灰および非火山灰段丘滞積物に由来する有機質土の物理的性質，農業土木学会論文集，第71号，昭52, pp. 1~7
- 15) Kassiff, G. & Shalon, A.B., (1971) : "Experimental relationship between swell pressure and suction," Geotechnique, Vol. 21, No. 3, pp. 245-255.
- 16) Russell, E. R. and Mickle, J. L., (1970) : "Liquid limit values by soil moisture tension," Journal of ASCE, SM3, pp. 967-989.
- 17) 妹尾学：土壤水エネルギー指数 pF による土壤構造の考察，農業土木学会論文集，第14号，昭40, pp. 11~15
- 18) Olson, R. E. and Langfelder, L. J., (1965) : "Pore water pressures in unsaturated soils," Journal of ASCE, SM4, pp. 127-150.
- 19) Yong, R. N. and Warkentin, B. P., (1975) : "Soil properties and behaviour," Developments in Geotechnical Engineering 5, Elsevier Scientific Publishing Company, pp. 197-206.
- 20) 竹中肇：収縮挙動より見た土の工学的性質，農業土木学会論文集，第14号，昭40, pp. 32~35