

土の収縮特性に及ぼす土壌構造の影響

吉 田 力
(山形大学農学部農業工学講座)
(平成4年9月1日受理)

The Influence of Soil Structure on the Shrinkage Properties

Chikara YOSHIDA

Section of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture,
Yamagata University, Tsuruoka 997, Japan
(Received September 1, 1992)

Summary

The relation between the soil structure and the behavior of the shrinkage on compacted soil was investigated in this paper. Therefore the laboratory works were carried out by using some samples of compacted soil which had various clay minerals and some samples which were added Ca^{++} or Na^+ .

The results obtained were as follows :

- 1) Two characteristic types about shrinkage properties of compacted soil were ascertained through these experiments. On one type, three stages of shrinkage behavior were observed i. e. normal shrinkage, residual shrinkage and no-shrinkage. On the other type, the normal shrinkage was not observed.
- 2) It was ascertained that the reason for showing these different shrinkage behaviors was related to the aggregate structure of soil. Normal shrinkage stage appeared on the soil which contained many fine particles but it did not appear on the soil with growing aggregate structure.
- 3) The model which expresses these shrinkage behaviors was suggested in (Fig. 5).
- 4) It was ascertained that the influence of cation on the soil was strongly related to the specific surface area of soil.

I. はじめに

土の収縮現象に関する研究は古くから注目されてきたが、粘性土の収縮挙動に関わる因子は多く、それらの因子を分離し検討することは困難であったので、量的な把握が主になされてきた。そしてその結果は土の分類、路床土の判定や凍上性の推定などに利用されてきた。しかし近年、収縮現象は土壌構造との関連での検討が多く見られる。例えば、不攪乱土と練り返し土の収縮挙動を測定することにより、土壌の巨視的な構造の発達程度が量的に表わせることや^{1,2)}、粘質土の物理的挙動に及ぼ

す吸着カチオンの影響について、土・水系の構造の観点から検討し、収縮特性を粒子配列との関連で整理したものの³⁾、さらには、個々の団粒の乾燥脱水による収縮挙動から団粒の形状特性を評価し、体積収縮過程をpFで整理し、その結果を団粒の構造性と関連づけている報告⁴⁾等がある。このように土の収縮現象に関する研究は量的把握から質的把握へと急速に進んできている。

本研究は土の構造との関わりのもとで、異なる粘土鉱物をもつ3種類の試料を用い、締め固め土の収縮特性について検討し、次に吸着カチオンがどのように収縮挙動および土の構造に関わるかを明らかにしようとするもので

ある。

II. 試料および実験方法

1. 締固め土について

先にも指摘したように、粘性土の収縮挙動に関わる因子は複雑なので、いかなる初期条件で実験を開始するかが重要となる。粘性土の収縮は水分の蒸発が主たる原因であるが、それにとまなう土粒子の位置の変化も大切な要因となる。ここではまず締固め土の収縮特性を明らかにするため、粘土鉱物の異なる3種類の土を用いて実験を行った。その初期条件は土の持っている水分のエネルギー状態(pF)で統一することにした。また、使用した供試土は風乾土で粒径は0.42mm以下である。水分状態はpF 3.9, 3.4, 3.0, 2.6とした。供試体の形状は高さ5.0cm, 直径5.0cmの円柱状である。供試土の締固めは供試体の場所による密度のばらつきを小さくするため、予備実験からサンプラーに入れた試料をコンクリートの台に一定回数たたきつけ、その後上面をジャッキで締め固めた。収縮量は図-1に示すように昆虫ピンを埋め込んだ6カ所を読み取り顕微鏡で測定した。乾燥の際には供試体の底部に細いガラス棒のコロを入れ、収縮に伴う供試体底面の摩擦を軽減するようにした。実験時の室温はおよそ20~25℃である。作製した供試体の物理常数は表-1の通りである。

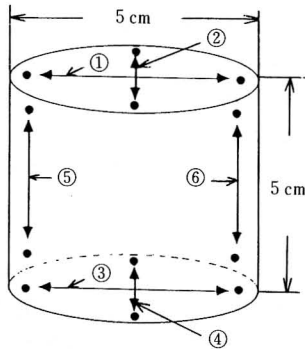


図-1. 供試体の収縮量の測定位置

2. カチオン添加土について

粘性土に及ぼす吸着カチオンの影響については、分散・凝集に関するもの⁵⁾、同一電解質濃度で分散・凝集沈降を示すNa, Ca粘土における収縮挙動の検討³⁾、吸着カチオンの種類や塩類濃度の違いが液性限界、塑性

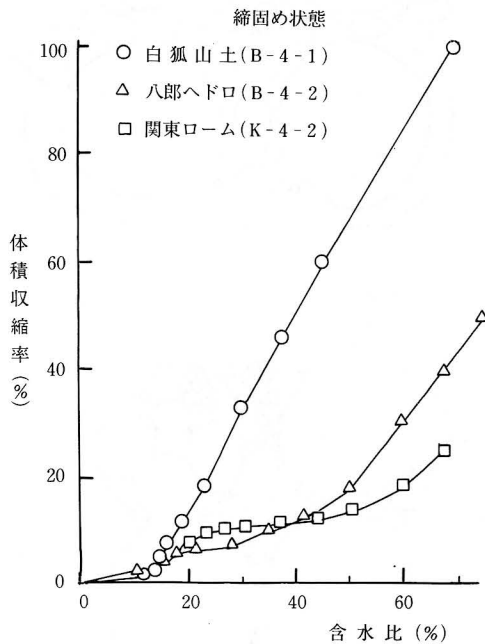
表-1 供試土の種類と供試体の作製条件

供試土の種類	水分状態 (pF)	含水比 (%)	飽和度 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	供試体番号
関東ローム	3.8	52	73.0	0.93	K-1-1
		52	86.3	1.03	K-1-2
	3.3	60	78.8	0.88	K-2-1
		60	96.1	1.01	K-2-2
	2.9	65	82.6	0.86	K-3-1
		65	96.4	0.98	K-3-2
	2.6	70	98.0	0.94	K-4-1
		70	100	0.95	K-4-2
八郎ヘドロ	3.9	47	74.2	0.98	H-1-1
		47	90.1	1.10	H-1-2
	3.4	57	90.1	0.98	H-2-1
		57	96.0	1.00	H-2-2
	3.0	68	81.1	0.81	H-3-1
		68	86.3	0.85	H-3-2
	2.6	75	89.3	0.81	H-4-1
		75	95.7	0.85	H-4-2
白狐山土	3.8	50	95.4	1.12	B-1-1
		50	97.6	1.14	B-1-2
	3.4	52	94.8	1.11	B-2-1
		52	98.5	1.14	B-2-2
	3.0	58	94.5	1.02	B-3-1
	2.6	70	95.5	0.98	B-4-1

限界に及ぼす影響についての整理⁶⁾等様々な研究が見られる。ここでは団粒構造の異なる3種類の土を用い、カチオンと土の収縮特性・構造の関係を明らかにする。供試土にはNa⁺, Ca⁺⁺をそれぞれ5段階の濃度で添加したものをを用いた。供試土の種類および各供試土へのNa, Caの付着量は表-2に示した。収縮試験は公定法で行った。なお、締固め土および添加土の実験に使用した土の種類と粘土鉱物の関係は、白狐山土(カオリナイト), 八郎ヘドロ(モンモリロナイト), 関東ローム(アロフェン), 月山土(火山泥流に由来する土であるがいろいろな粘土鉱物が混入して主たる鉱物は特定できなかった), 市販のカオリナイトである。

表—2 供試土への塩類付着量

塩の種類	試料作製時の 溶液濃度 (N)	関東ローム 付着量 (mg/kg)	月山下層土 付着量 (mg/kg)	カオリナイト 付着量 (mg/kg)
N _a	無添加	7	45	44
	0.01	240	197	209
	0.05	1186	603	702
	0.10	2359	1258	1298
	0.25	4873	3443	3284
	0.50	10452	4439	3645
C _a	無添加	306	283	1020
	0.01	1005	382	1350
	0.05	2045	1520	2177
	0.10	3024	2608	2660
	0.25	6988	6217	5180
	0.50	16009	12968	8136



図—2. 各種土の体積収縮率と含水比の関係

Ⅲ. 結果および考察

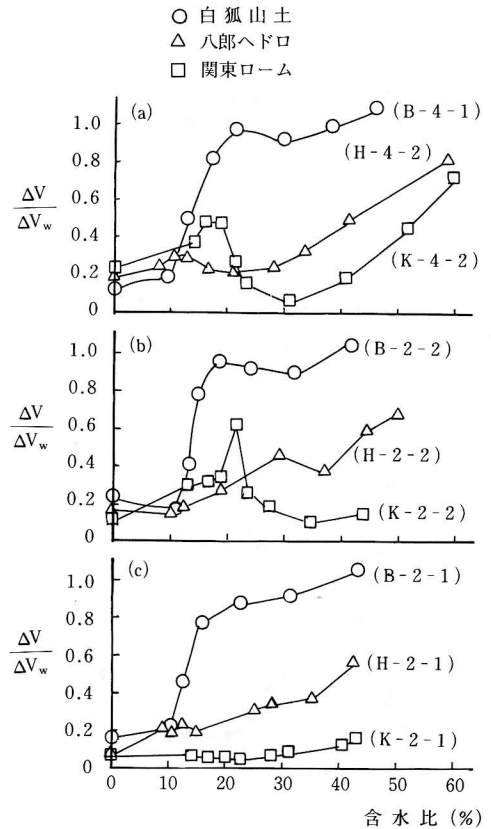
1. 水分量の変化と体積収縮量

図—2 は pF 2.6 の水分状態で締め固めたほぼ飽和状態の土の体積収縮率と、含水比の関係を示したものである⁷⁾。体積収縮率 V_{sv} は次式で求めた。ここで V' はそれぞれの乾燥状態での体積、 V_0 は炉乾燥時の体積である。

$$V_{sv} = \frac{V' - V_0}{V_0} \times 100(\%)$$

図—3 には体積変化量 (ΔV) と水分変化量 (ΔV_w) の関係 ($\Delta V / \Delta V_w$) を、それぞれの乾燥状態での供試体の含水比で整理した。

図—2 によると、実験開始時の水分のエネルギー状態、飽和度はほぼ同じであるが、供試土の構造の違い (粘土鉱物の違い、土壌の生成過程の違い、吸着イオン・有機



図—3. $\frac{\Delta V}{\Delta V_w}$ から見た収縮特性

物含有量の違い)が反映され、この3種類の土の収縮挙動は明らかに異なる。図-3(a)と図-2を比較すると収縮挙動の違いがさらにはっきりする。図-3(a)の縦軸が1ということは、供試体の収縮量と同じ量の水分が供試体から失われたこと(正規収縮)を意味する。例えば、この値が0.7ということ、失われた水分量より供試体の体積変化が30%少ないということであり(残留収縮)、その分の空気が供試体中に進入したことになる。図-3(a)と図-2は同一供試体での結果であるが、白狐山土は含水比20%付近までは正規収縮が見られ、20~10%までは残留収縮、それより含水比が小さな領域では、水分の変化に伴う体積変化のほとんど見られない領域(無収縮)という典型的な収縮挙動を示す。図-2によると関東ロームの場合、含水比46~47%まではこの初期水分条

件では残留収縮を、それ以後含水比20%付近までは無収縮に近い挙動を示す。しかし、図-3(a),(b)によると20~15%の含水比の範囲内で山型の部分が現われ、さらに含水比が低下すると無収縮に近い挙動を示す。この山型の現われる理由は後述するが、団粒内部の収縮によるものと思われる。八郎ヘドロは白狐山土と関東ロームの間のような挙動を示すが、正規収縮の領域は現われない。

図-3(b)はpF3.4付近の水分でしかもほぼ飽和状態で締め固めたもの、(c)は同一水分でポーラスな状態で締め固めたものである。(b)図では関東ロームの山型が特徴的であるが、白狐山土、八郎ヘドロでは、(a)図と同様な収縮挙動を示している。また、(c)図では白狐

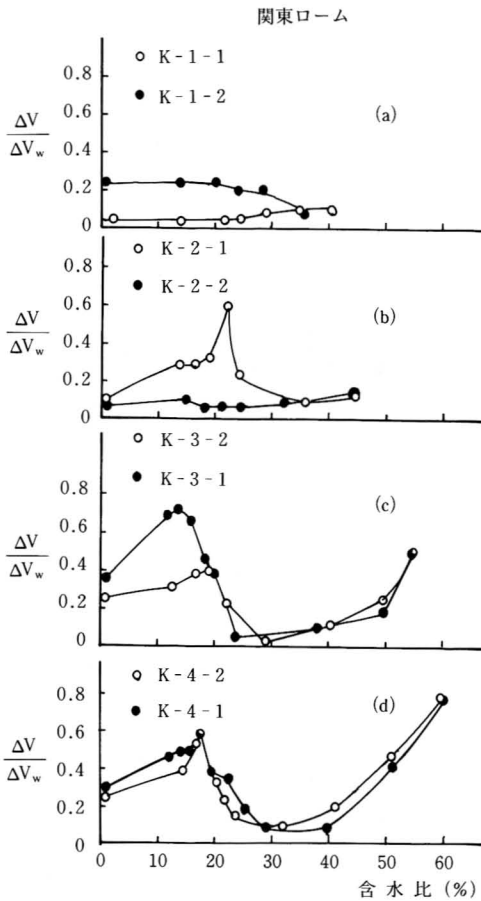


図-4. 各種条件で締め固めた供試体の $\frac{\Delta V}{\Delta V_w}$ - 含水比の関係(関東ローム)

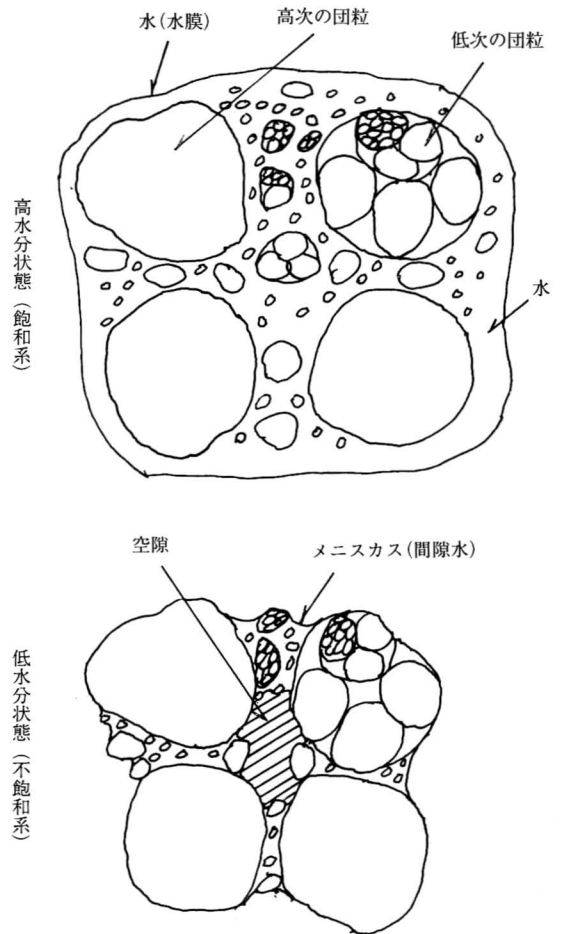


図-5. 収縮試験における供試体の初期状態の模式図

山土、八郎へドロはこれまで見てきた挙動と同じ傾向とみなされるが、関東ロームには団粒の影響と思われる山型の部分は見られない。そこで関東ロームのいろいろな締固め条件での $\Delta V/\Delta V_w$ と含水比の関係を図-4に示した。団粒の収縮の影響と思われる山型部はほぼ同じ水分領域に見られる。しかし(a)図の低水分、低飽和度の場合には山型は現われなくなる。この理由としては、比較的高水分状態、あるいは飽和状態に近い供試体では団粒間の空隙に水分を多く保有することが可能であるからと思われる。このような場合、収縮はまず団粒間の空隙水の蒸発により起こり、その後団粒内の水分の蒸発による団粒の収縮が起こるものと考えられる。しかし低水分、低飽和土の場合には団粒間の水分が少ないため、団粒間の空隙水と団粒内の水分の蒸発が同時に起こることが考えられ、比較的なだらかな収縮曲線が得られるものと推定される。これを図-5に模式的に示した。

2. 体積収縮量と土の構造

これらの収縮挙動の違いを土の構造(挙動単位の粒径)との関連で検討してみる。そのため供試土の粒度、耐水性団粒分析、沈降体積試験を公定法に従って行い、結果を図-6, 7, 8に示した。

粒径は関東ロームが一番粗く、粘土分も15%と少ないが、白狐山土は粘土分は40%近くあり、また、八郎へドロは0.005~0.05 mmの範囲に65%以上の粒径が集中しているのが特徴的である(図-6)。団粒分析は、団粒の耐水性を見るのが目的であったため、4.76 mm以下の試料で行ったものである。この結果によると、白狐山土が耐水性が悪く、もっともスレーキングを起こしやすい土であると解釈できる(図-7)。図には示さなかったが、

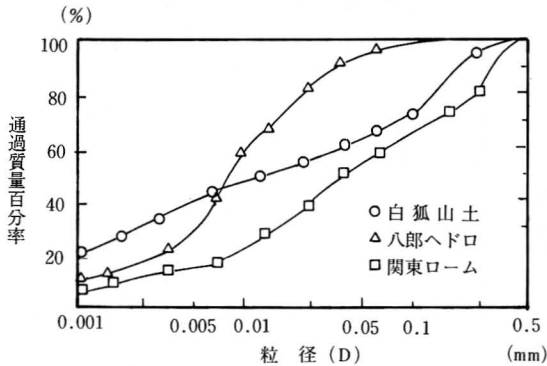


図-6. 供試土の粒径加積曲線

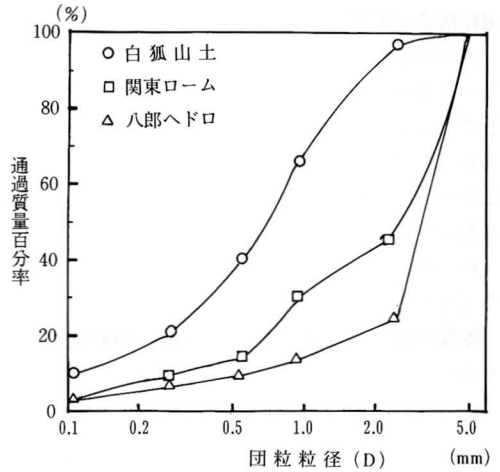


図-7. 供試土の耐水性団粒

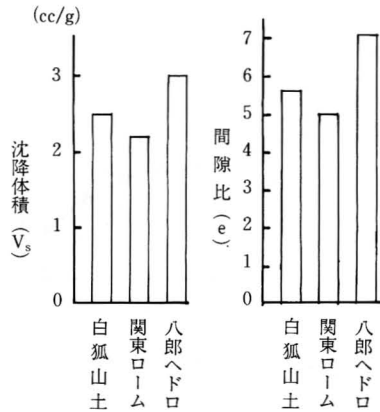


図-8. 各種土の沈降体積と間隙比の関係

直径2 cm程度の土塊を水中に入れてみると、白狐山土はみるみるスレーキングを起こすが、その他のものはほとんどスレーキングを起こさず、水に対しては安定な構造を持つ。さらに沈降体積試験の結果では、八郎へドロが圧倒的に大きく、次いで白狐山土で、一番小さいのが関東ロームである(図-8)。

これらの結果から3種類の土の構造特性と収縮挙動を検討してみる。白狐山土は粒径も小さなものも多く、しかも水に対して不安定な構造を持つ。したがって収縮挙動に関与する粒径は小さなものと思われ、収縮に伴う土粒子の移動もスムーズなので、正規収縮の領域が大きな収縮挙動を示すものと考えられる。関東ロームは粒径も大きく、団粒は水に対してきわめて安定な構造を持つ

で、団粒構造の影響が強調される収縮特性となるのであろう。さらにその中間の収縮特性を示す八郎へドロは、関東ロームよりは粒径は小さいが、団粒構造は発達している土である。しかし沈降体積試験の結果やあるいは粘土鉱物が2:1型の膨潤性のものであることを考えると、この土の団粒構造は関東ロームよりは弱く、収縮という外力を受けると、ある程度団粒は微細化することが考えられ、関東ロームと白狐山土の中間の収縮挙動を示すものと思われる。

3. 乾燥密度・収縮率の変化から見た収縮特性

収縮過程での乾燥密度(ρ_d)—含水比(w)の関係を図-

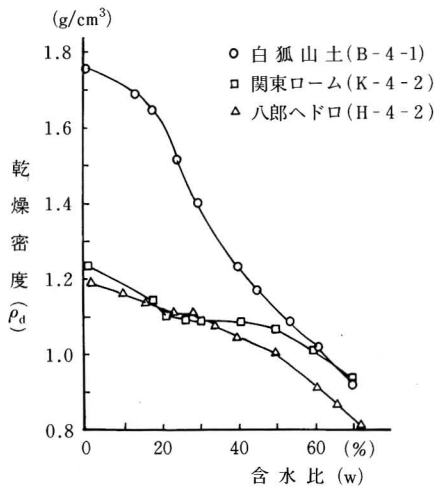


図-9. 収縮過程における乾燥密度と含水比の関係

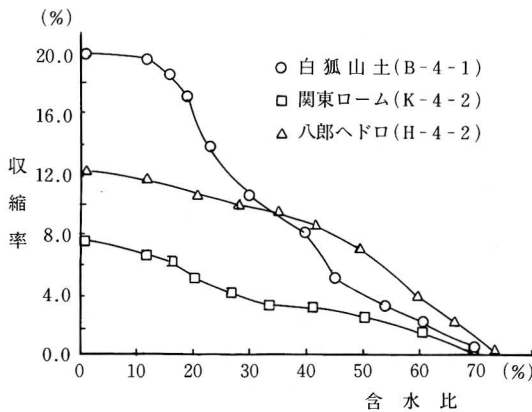


図-10. 各供試土の収縮率—含水比の関係(乾燥過程)

9に、収縮率—含水比の関係を図-10に示した。

ここで収縮率とは、次式で求めた。

$$\text{収縮率} = \frac{1 - 1_x}{1} \times 100 (\%)$$

1: 実験開始時の供試体長

1_x: それぞれの乾燥状態での供試体長

図-9から白狐山土は収縮開始時から急激に乾燥密度が増加し、供試体からの脱水に伴う土粒子の移動がスムーズなことがこの結果からも考えられる。関東ローム、八郎へドロの収縮挙動は前述した結果と一致するものである。ただ含水比0% (炉乾燥状態)の密度の違いからも他の試料に比べ、白狐山土の収縮量が著しいのが明らかである。図-10には一例として供試体の④方向における収縮率の変化を示したが、この結果からも耐水性で比較的硬い団粒構造を持つ関東ロームがいかに収縮しにくい土であるかがわかる。ここでも八郎へドロは他の二種類の土の中間の挙動を示し、前述の収縮挙動の理解が適切なことを裏付けるものといえよう。

4. 土粒子の配列について

Lembe⁸⁾は突固めによる土粒子の配列について、最適含水比より乾燥側では土粒子はランダムに配列しているが、湿潤側では配向しているとの指摘をおこなっている。また、突固め土の粒子の配列の程度について、収縮試験の結果から縦方向、横方向の収縮率の違いを求め、その程度を配列指数という指数で表示するという提案もある⁹⁾。これらの考え方に従い、土の種類異なる供試体で縦ひずみと横ひずみを比較してみる。図-11に示した例は、初期水分状態 pF 2.6 で飽和状態に近い状態まで締固めを行った供試体の乾燥過程の粒子の配列状態を見たものである。ここで縦・横収縮比とは次式によった。

$$\text{縦・横収縮比} = \text{横方向収縮比} / \text{縦方向収縮比}$$

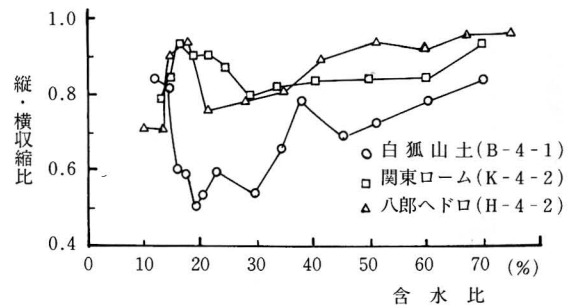


図-11. 収縮過程における縦、横ひずみの関係

それぞれの収縮比は次式から求めた。

$$\text{収縮比} = \frac{l_x - l_0}{l_0}$$

l_0 : 炉乾燥時の長さ

l_x : ある乾燥状態での長さ

図には①方向の収縮比/⑥方向の収縮比, ③方向の収縮比/⑥方向の収縮比の平均値(縦・横収縮比)と含水比の関係を示した(① ③ ⑥は図-1参照)。縦・横収縮比が1以下ということは縦方向の収縮量より横方向の収縮量が多いことを意味する。図によると, 3種類の土とも乾燥開始時には縦・横収縮比が1に近い値を示し, 乾燥が進むにつれて横ひずみが大きくなり, さらに乾燥が進み, 無収縮状態に近い水分状態になると, 縦ひずみと横ひずみの差がなくなるという一般的傾向が見られた。また, 白狐山土が八郎ヘドロ, 関東ロームに比べ, 乾燥が進むに従い縦・横収縮比が小さくなり, これは土粒子の配向の影響によるものと考えられる。さらに収縮挙動に関与する粒径が微細であるため, 土粒子の移動が容易であるものと思われ, 収縮挙動の違いとなったものと考えられる。これらの結果は前述してきた結果と一致する。

5. 収縮挙動に及ぼす吸着カチオンの影響

吸着カチオンのコンシステンシー特性に及ぼす影響に関する研究には, たとえば, カオリナイト系非膨潤性の土に Ca^{++} , Na^+ を濃度を違えて添加し, 液性限界, 塑性限界について検討したものや⁶⁾, いろいろな種類の土に一定条件で Ca^{++} , Na^+ を添加し収縮限界を求めると, 一般に配向構造を有する Na 土より疑配向構造を有する Ca 土で高い値が得られることなどを明らかにしたものが³⁾。このように吸着カチオンと土の力学特性に関する研究は多いが, ここでは表-2の添加土を用いて収縮試験を行い, 土壌構造との関連を検討する。

図-12にはそれぞれの試料の収縮限界を示した。関東ローム, 月山土では Ca^{++} , Na^+ 添加土とも添加濃度が濃くなるにしたがって収縮限界が小さくなる傾向を示すが, 市販のカオリナイトではイオン添加濃度の影響はほとんど見られない。 Ca^{++} , Na^+ の比較では関東ロームでその差は明らかであるが, その他の供試土では一定の傾向は見られない。また, 図-13には収縮試験後の試料の乾燥密度を示したが, その値は収縮試験の結果とよい対応を示している。すなわち, 収縮限界の小さなものは低水分状態まで収縮が続くので, 結果として収縮後の密度が高くなる。これらの現象の説明は現在検討中のも

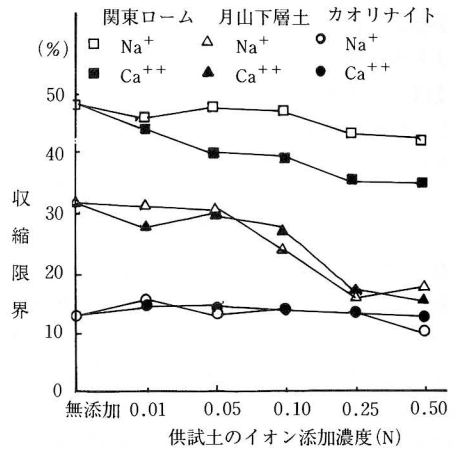


図-12. 土の種類およびイオン添加濃度の違いと収縮限界

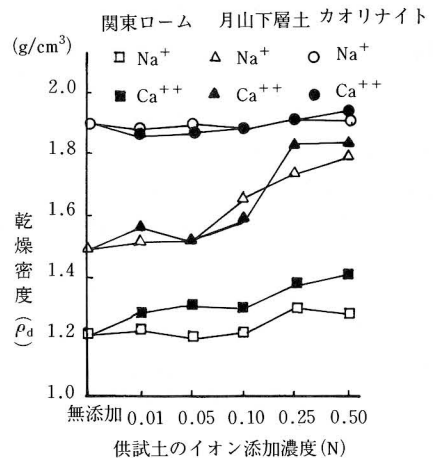


図-13. 収縮試験後の供試体の乾燥密度

のもあり, 明解な説明はできないが, 次のような要因が考えられる。

それぞれの試料の比表面積は, 関東ローム, 月山土, 市販のカオリナイトの順で185, 71, 20 m^2/g であり, この値は図-12の収縮限界とよい対応を示している。また, 粘土粒子の表面は一般に負に帯電しているので拡散二重層が形成されるが, その厚さは一価の荷電を持つ Na^+ のほうが Ca^{++} より厚くなり, その結果二重層内の水分は多くなる。カオリナイトのような比較的大きな粒径からなる土は, 粒子表面の荷電も弱く, イオンの影響を受けにくいし, 構造も発達しにくい。図-12と13か

ら明らかのように、ポーラスな構造を形成する土では収縮限界は大きな値を示す。これらの要因を分離して収縮挙動に及ぼすカチオンの影響を説明するまでには至らなかったが、収縮挙動に土の構造が深く関わることは明らかであろう。

Ⅳ. おわりに

締固め土の収縮挙動について土壌構造との関連でその特徴を説明することを目的とした。そのため構造の異なる種々の土で実験を行い、加えて土壌構造に直接関わる Na^+ 、 Ca^{++} 添加土についても検討し、次の結果を得た。

- 1) 締固め土の収縮挙動には、正規収縮、残留収縮、無収縮の三段階が存在するもの、残留収縮、無収縮の二つの段階しか存在しないものの二種類に大別された。
- 2) さらに後者の場合は団粒に強く影響される挙動を示すことが明らかとなった(関東ローム)。
- 3) 団粒構造の影響の強い土の収縮挙動を模式図を用い説明した。
- 4) 締固め土の収縮過程における縦ひずみ、横ひずみの関係を明らかにした。
- 5) 収縮特性に関するカチオンの影響について、実験を通して考えられる土壌構造との関連を整理した。

以上であるが、今後に残された問題も多く、さらに検討していく予定である。なお、本研究を進めるにあたり、東山 勇教授からは数々の適切な助言を頂いた。さらに実験およびデータの整理には山崎加津子氏にご協力頂いた。記して謝意を表します。

引用文献

- 1) 矢沢正士・前田 隆：非火山灰土壌の不攪乱試料の収縮挙動と土壌構造の関係について—粘土質土壌の理工学性と土壌構造に関する研究(I)—, 農土論集, 101 pp. 33~45(1982)
- 2) 矢沢正士・前田 隆：火山灰土壌の不攪乱試料の収縮挙動と土壌構造の関係について—粘土質土壌の理工学性と土壌構造に関する研究(II)—, 農土論集, 102 pp. 25~35(1982)
- 3) 矢沢正士：粘土質土壌の収縮挙動におよぼす吸着カチオンの影響—粘質土の物理的挙動と吸着カチオンに関する研究(III)—, 農土論集, 67 pp. 30~36(1977)
- 4) 新垣雅裕：団粒の収縮挙動, 農土論集, 134 pp. 45~50(1988)
- 5) 赤江剛夫：添加塩濃度がベントナイト・水系の分散・凝集および流動特性に及ぼす影響—ベントナイト・水系の分散・凝集と流動特性(II)—, 農土論集, 133 pp. 43~50(1988)
- 6) 中石克也・岸上定男：非膨潤土の液性・塑性限界について—吸着カチオンが非膨潤土のコンシステンシーに及ぼす影響(II)—, 農土論集, 108 pp. 65~72(1983)
- 7) 吉田 力：土の締固め機構とその効果に関する研究, 山形大学紀要(農学), 第10巻, 第2号, p. 56(1987)
- 8) Lambe, T. W. : The structure of compacted clay, Proc. A. S. C. E. 84, SM 2, p. 1654(1958)
- 9) 小橋英夫：粘土の構造とその表示法について, 土壌物理研究, No. 1, pp. 18~22(1964)