

# 関東ロームのコンシステンシー特性について

## THE CHARACTERISTICS OF CONSISTENCY OF KANTO LOAM

飯 竹 重 夫\*  
By Shigeo IITAKE

### 1. ま え が き

関東ロームは他の粘性土と比べ工学的に種々の特異性をもつが、その中の主要な1つにコンシステンシーがある。関東ロームのコンシステンシー特性についてはこれまでに、試験前の試料の乾燥処理程度により液性・塑性限界値が変わる<sup>1)2)</sup>こと、流動曲線が直線とならず折線状となる<sup>3)</sup>こと、注水後の練合せ時間によって液性限界値が変わる<sup>4)</sup>ことなどの報告がされている。また、関東ローム研究委員会(土質工学会)において判別分類という観点から液性・塑性限界値などについて注水後の練返しあるいは放置時間、初期含水比、超音波処理などの影響についての調査<sup>5)6)</sup>がされている。

関東ロームの自然含水比が高いのは土構造内あるいはその近傍に非自由水分が多量に包蔵されているためであり、これが特異な工学的性質の一因といわれている<sup>7)8)</sup>。たとえば、久野は土の締固めにおいて土中の水分を土粒子の1部として稼動する拘束水分と土粒子間にあって直接締固め作用を支配する自由水分とに分けて考えた方が合理的であることを論じ、その結果から関東ロームの工学的な特異性を説明している<sup>10)11)</sup>。また、土構造は乾燥、練返しによって変化しやすい特殊な骨格構造<sup>12)</sup>からなる団粒構造<sup>13)</sup>であるといわれており、この団粒の状態がコンシステンシー特性に影響を及ぼしていると推察される。

本論文では関東ロームのコンシステンシーの特異性についてその主要因と考えられる含有水分と土構造の面から考察を加えた。含有水分については土中の水分を自由水分と非自由水分とに分けて考え、土構造に関しては団粒の粒度分布とその破砕量について考えた。

### 2. 実験方法

#### (1) 試料の調製

試料は千葉市郊外の地山から練返しの生じないように土塊のまま採取したもので、採取深さ 0.4~1.0 m、色は茶褐色、自然含水比が 116.0% であることや、X 線回折図にピークが生じないなどから立川ロームと思われる。試料は大きな土塊があると試験結果に影響すると考えられるのですべて 4760  $\mu$  ふるいを通した。これを自然含水状態で練返した試料(練返し機により練返し程度を変えたもの)、練返さない試料、乾燥試料(炉乾燥したものあるいは空気乾燥により初期含水比を変えたもの)の3種に調製し実験に供した。練返し機は写真-1に示すサンドミルを使用した。これは付属のローラーの回転により土塊を押しつぶしながら練返しを行うもので、現場での施工機械による土の練返しのメカニズムに比較的類似した状態と思われる。練返し程度のコントロールはローラーの回転数が一定(28 r.p.m.)であるので

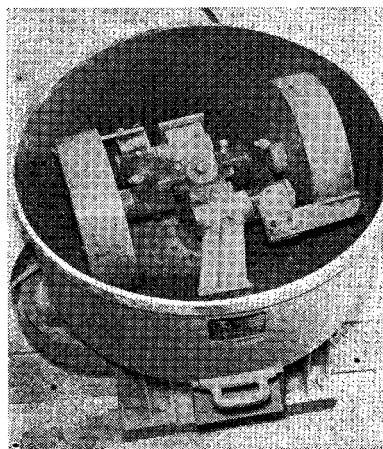
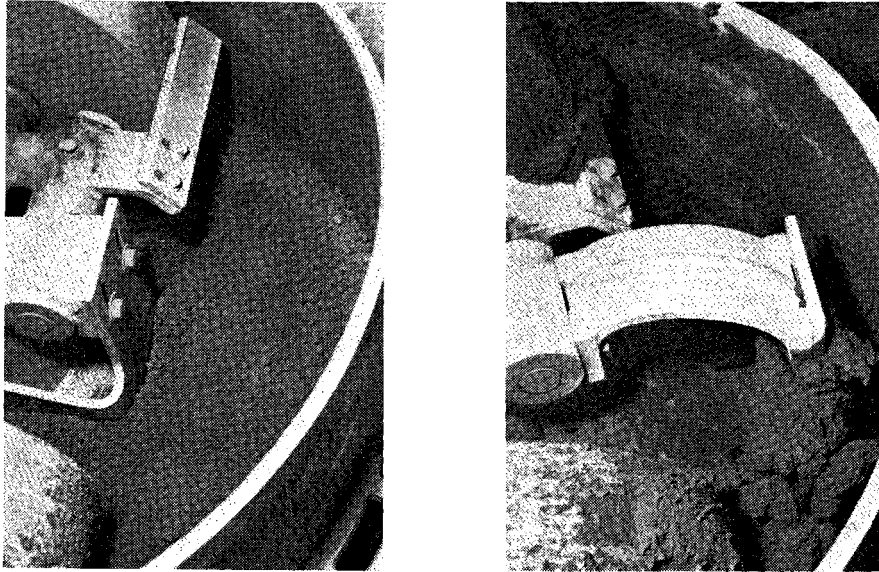


写真-1

\* 正会員 工修 木更津工業高等専門学校助教授 土木工学科



(a) 練返す前の試料

(b) 練返した後の試料

写真-2

時間で行った。写真-2 (a), (b) は練返す前後の試料の状態であるが、このように 60 分程度の練返しを受けるとかなり軟弱化し、土性がまったく変わっている様子が観察される。

(2) 液性限界 (L.L.), 塑性限界 (P.L.) 試験

L.L. 試験は図-1 に (A)~(G) の記号で示す 7 種の方法で行った。練返しとは一般に行われているように試料に加水し種々の含水量の試料を作る場合に同一の試料を練返して使用する方法、非練返しは各含水比別に毎回新鮮試料を使う方法である。また、加水過程は通常行われているように試料の含水比を増加させつつ試験を進める方法で、乾燥過程は最初に落下回数 (N) が 3~4 回になるまで加水し、これをドライヤーで乾燥させて含水比を低下させつつ試験を進める方法である。P.L. 試験は JIS に従って行った。

(3) 粒度分布の測定

団粒は一般にその粒径によって土塊、団粒、微細団粒に分けられ<sup>14)</sup>、コンシステンシー特性には実験の性格上、後の 2 つの団粒範囲が問題の対象となると考えられる。したがって、正しい粒度分布 (厳密には団粒径分布の方が正確な表現かもしれない) を求めるには測定中に団粒を壊さないことと、微細団粒の綿毛化を防ぐことが重要となる。このため、試料を最初に 74 μ ふるい残留分と通過分とに分け、別々に実験を行った。この時の観察では団粒は予想以上に強く結合されており、5 分程度の煮沸によってはほとんど破壊しなかった。微細団粒の分散については分散剤として 0.2 N の希塩酸を添加<sup>15), 16)</sup>して 2 日間放置し、pH 値が安定した後に沈降分析を行った。塩酸の添加量については試料によってもっともよく分散する最適量があるようでこれを図-2 に示す。各試料とも pH 値が 4.2~4.8 の範囲に最適値が存

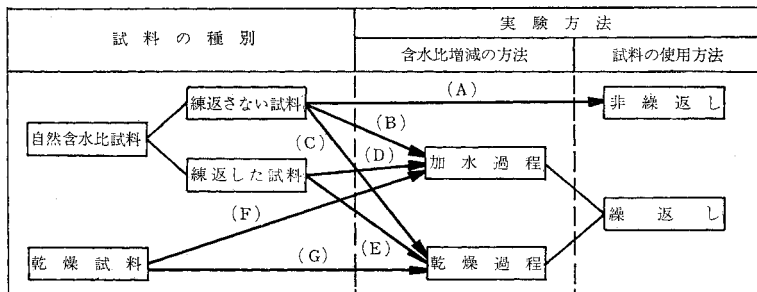


図-1 L.L. 試験の種類別

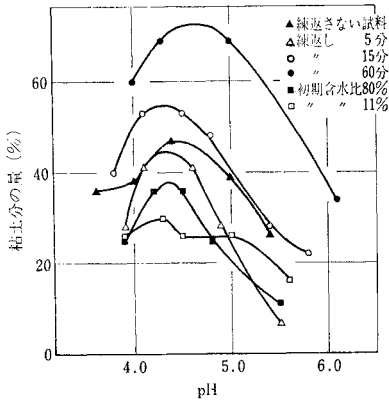


図-2 pH と粘土分量の関係

在しており、以後の実験では懸濁液の pH 値をこの範囲になるようにした。

(4) 含有水分の遠心脱水による分離試験

土中の含有水分を遠心脱水によって自由水分 (含水比で表わし  $w_f$ %) と非自由水分 (含水比で表わし  $w_c$ %) とに分離する場合、同一の関東ロームであっても乾燥あるいは練返しの程度によって、この両水分を分ける境界の遠心力は異なっていると考えられる<sup>17)</sup>。したがって、各試料ごとにこの境界の遠心力を求める必要がある。

遠心分離機は超遠心機 (真空冷却式, 最大遠心加速度 110,000 g) でローターは角度型を使用した。試料に加わる平均の遠心力は重力 (g) の倍数 (G) を用いて次式で表わされる。

$$G = \frac{r}{g} \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

ここに、 $r$ : 試料の平均回転半径 (cm),  $n$ : 回転数 (r.p.m.),  $g$ : 重力の加速度 (cm/sec<sup>2</sup>)

遠心脱水により土中の水分を分離する場合、脱水量は

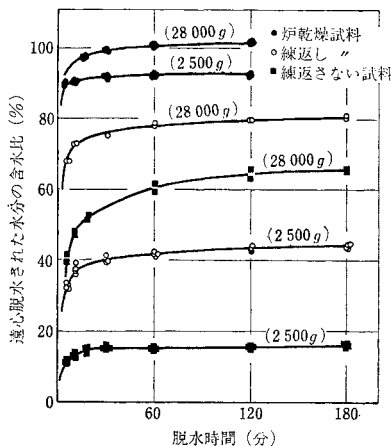


図-3 遠心脱水における脱水時間の影響

脱水時間によっても変わるがその特性を 図-3 (図中縦軸は分離された水分と 炉乾燥土との重量百分率) に示す。3種の試料はいずれも 24 時間水浸し、十分吸水飽和させたものである。乾燥および練返しが少なく、遠心力が高いほど土中の水分と遠心力は平衡に達しにくいよう、120 分付近でも脱水量はわずかではあるが増加しているものもある。しかし、その量が少ないことと実験の能率を勘案して脱水時間は 60 分とした。

初期含水比および練返し程度の異なる試料についての遠心力と遠心脱水後の試料の含水比との関係を 図-4, 5 に示す。図-4 では試料はいずれも水浸し十分吸水飽和させたものであり、図-5 の練返し試料はほぼ飽和状態であったため非水浸である。実験結果はほぼ次の双曲線式であてはめることができる。

$$w_c = w_{c0} - \frac{G}{a + bG}$$

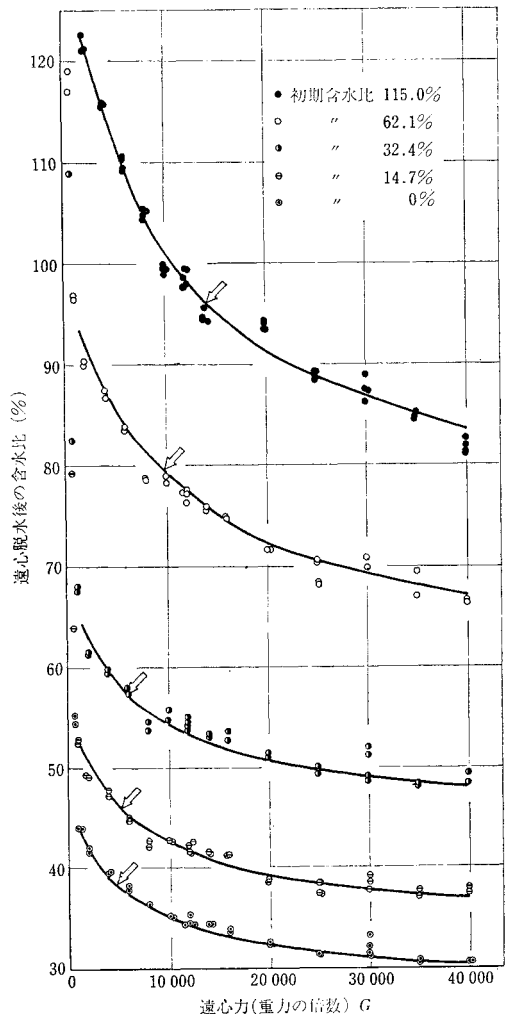


図-4 初期含水比の異なる試料の脱水曲線

ここに、 $G$ ：試料に加わる遠心力の平均の大きさを重力の倍数で表わした値、 $w_{c0}$ ： $G=0$  に相当する  $w_c$  の値、 $a, b$ ：試料によって決まる定数。

図-4, 5 に上式で求めた曲線を実線で示す。これらの曲線はいずれも変曲点を有しており、含有水分はこの付近を境に団粒あるいは土粒子への付着、吸着の程度を異にしていることになり、近似的には自由水分と非自由水分の境界をここに設定することができよう。この変曲点に相当する遠心力 ( $G_{cr}$ ) は図-6 (図中、 $w_{cr}$  は変曲点に相当する  $w_c$  の値、 $k$  は定数、 $X, Y$  軸は漸近線) に示す双曲線の幾何学的性質 ( $\alpha=45^\circ$  の時、直線は双曲線の変曲点で交叉する) を利用し、次式で求めた (この位置を図-4, 5 中に矢印で示す)。

$$G_{cr} = \frac{\sqrt{a - a\sqrt{k}}}{b\sqrt{k}}$$

以後の実験では各試料の  $G_{cr}$  を求め、この遠心力で含有水分を分離した。練返さない試料 (非水浸) では  $G_{cr} \approx 15,000 G$  であるが、これは pF 値に換算すると約 4.2 となり、これまでに自由水分と非自由水分との境界といわれていた値<sup>(8)</sup> とほぼ一致する。

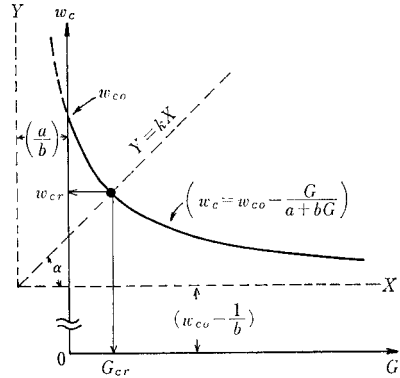


図-6 脱水曲線の変曲点の位置を示す模式図

### 3. コンシステンシーおよび粒度分布の特性

#### (1) 流動曲線の特異性

図-7~10 に7種の方法 (図-1 に A~G の記号で示す) で実験を行った結果の流動曲線を示す。練返さない試料の加水過程 (図-7) では大崎も指摘しているように曲線は  $N=15$  回付近で折れているが他の試料、方法ではほぼ直線となっている (乾燥試料ではわずかに折れている)。また、加水、乾燥過程の違いによって練返し試料 (図-9) では両者に違いがみられないが練返さない試料および乾燥試料 (図-10) では異なった傾向を示す。練返さない試料で非練返しの場合 (図-8) も練返しと比べ異なる値を示している。流動指数は各ケースによってすべて異なる値となっている。含有水分に着目すると、 $w_f$  はいずれの場合もほぼ  $w$  と同様な挙動を示しているが  $w_c$  は落下回数に無関係にほぼ一定となっている。

#### (2) 乾燥、練返しによる粒度分布の変化

図-11 に3種の試料についての L.L. 試験開始時 (落下回数  $N=40$  回) の粒度分布を示す。乾燥、練返し試料の粒度は練返さない試料に対しそれぞれ粗粒側あるいは細粒側に移行しており、同一土質で落下回数が等しくても各試料の団粒の状態はかなり異なっているといえる。図-12 に試験開始時と終了時 ( $N=4$  回) の試料の粒度分布の違いを示す。練返さない試料では試験の前後でかなり粒度の違いがあるが、乾燥、練返し試料ではそれが非常に少なくなっている。また、練返さない試料の乾燥過程の場合は加水過程に比しかなり粗粒であり、 $N=40$  回と4回の差も少ない。

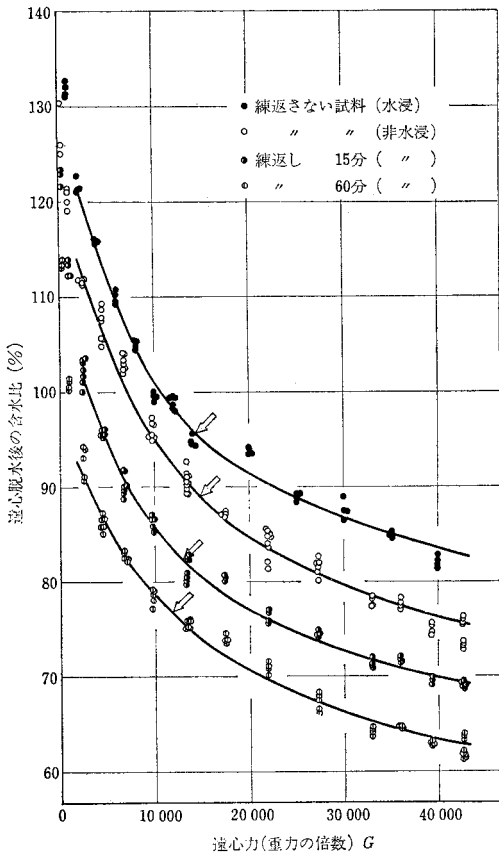


図-5 練返し程度の異なる試料の脱水曲線

(3) 試料の乾燥，練返し処理による L.L., P.L. の変化

準備する試料の初期含水比 ( $w_0$ ) および練返し時間 ( $t_k$ ) と L.L., P.L., P.I.,  $I_f$  の値の関係を 図-13, 14 に示す. 図-13 よりこれまでの研究と同様  $w_0$  の低下によって各指数は減少しており, 本研究では  $w_0$  が 60~80% 以下での減少が著しい. また, 図-14 より練返し程度の増加によっても各指数は減少しており, 特にそ

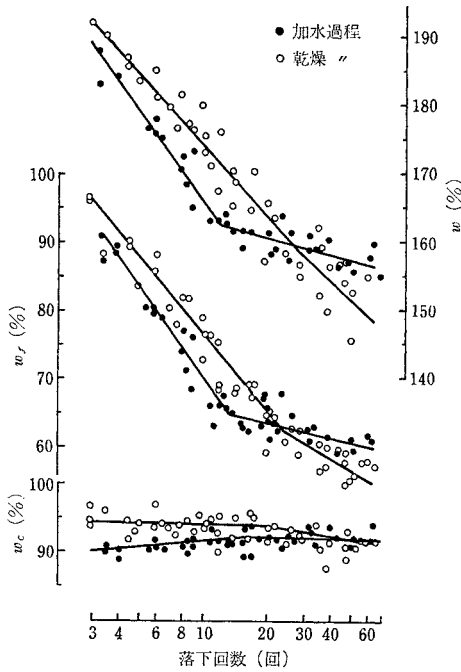


図-7 落下回数と  $w, w_f, w_c$  の関係 (練返さない試料)

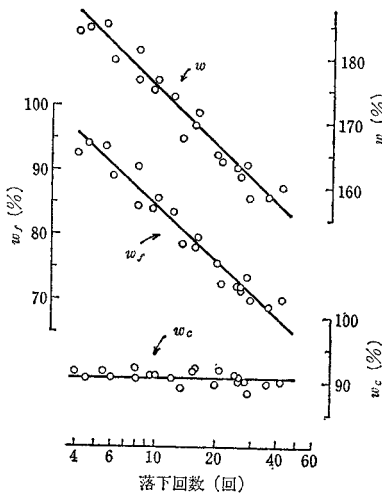


図-8 落下回数と  $w, w_f, w_c$  の関係 (非練返し)

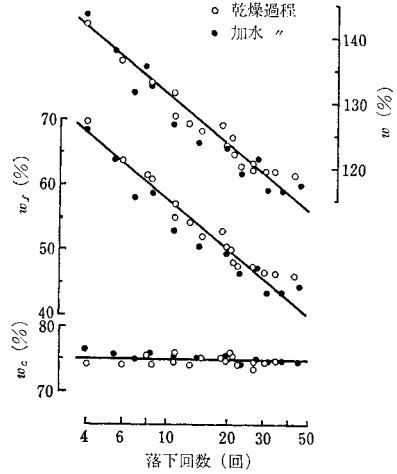


図-9 落下回数と  $w, w_f, w_c$  の関係 (練返し試料)

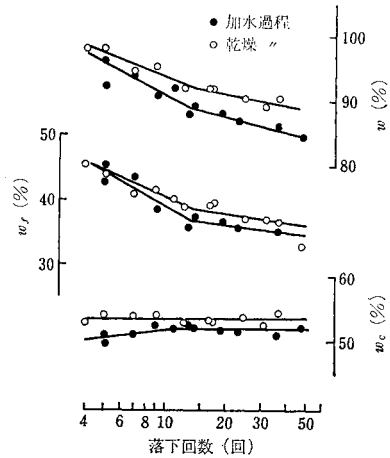


図-10 落下回数と  $w, w_f, w_c$  の関係 (炉乾燥試料)

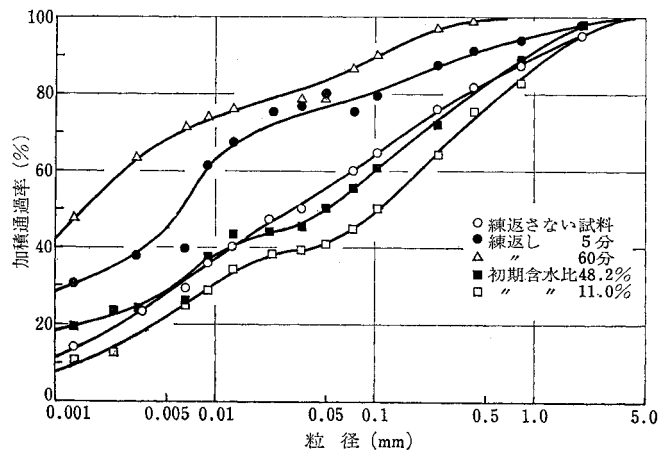


図-11 L.L. 試験開始時 ( $N=40$ ) の粒度分布

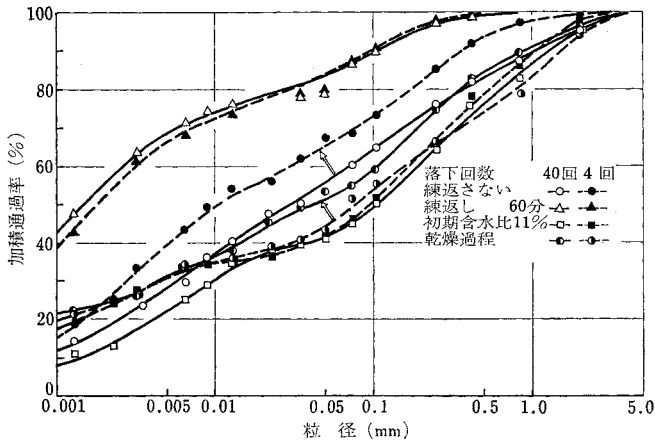


図-12 L.L. 試験前後の粒度分布

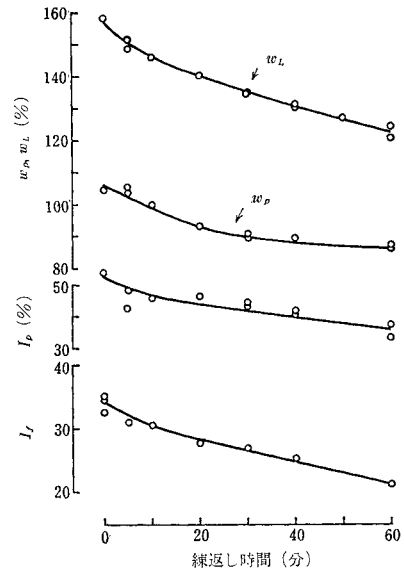


図-14 練返し時間と  $w_L, w_p, I_p, I_f$  の関係

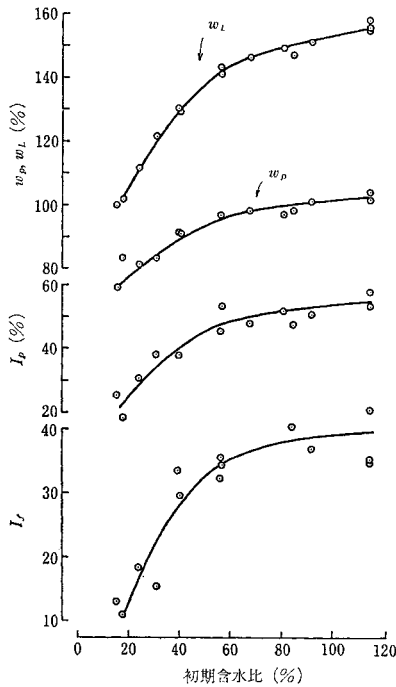


図-13 初期含水比と  $w_L, w_p, I_p, I_f$  の関係

の傾向は初期の  $t_k$  が 10 分までの間で顕著になっている。

#### 4. コンシステンシーの特異性に対する考察

##### (1) 土構造のモデル

立川ロームの主要粘土鉱物であるアロフェンは電子顕微鏡での観察によると直径 50~500 Å の球形で<sup>19), 20)</sup>、これらは常にある結合をもった凝集体(アグリゲート、ベッド、ファブリック等の名称でもよばれている<sup>21)</sup>が本

研究では比較的なじみの深い団粒を用いた)を形成しているといわれている。また、工学的には自然含水比が高く、保水力、比表面積が大きいなどの特性をもっている。これらのことから図-15(a)のようなモデルが組立てられる。ここで微細団粒は団粒の最小単位であり、その構造内あるいはアロフェン(単一粒子)の周辺に非自由水が拘束または吸着されていると考えられる。一方、練返しによって粒度が細粒化し、自由水分が増えることから図-15(b)のようなモデルが考えられる。乾燥した場合は団粒の固結による粒度の粗粒化、保水力の低下、土粒子比重の減少<sup>22), 23)</sup>などの現象を考えると図-15(c)のようなモデルが考えられる。

##### (2) 粒子破碎および含有水分の流動特性に及ぼす影響

試料の処理および試験中の練返しによる粒度分布の変化を定量的に表わす1つの方法として J. Marsal の提案した粒子破碎量の  $B$  値<sup>24)</sup>を考える。  $B$  値は基準の粒度分布との残留率の差 ( $\Delta i$ ) を粒径ごとに求め、図-16の例に示すような  $\log D \sim \Delta i$  図を作ると正の側の総面積で与えられる。すなわち、この面積は粒子破碎を受けた粒子の総量を表わしている。本論文では基準の粒度分布の粒度のもっとも粗いと思われる空気乾燥 ( $w_0=11.0\%$ ) した試験開始時の試料のものとした。

図-17に各試験方法(A~Gの記号は図-1に示すものと同じ)による流動曲線の性状の違いを模式的に示し(矢印の方向は実験の進行方向を表わしている)、図-18には試験過程の粒子破碎量( $B$ 値)を示した。練返さない試料に着目すると、加水過程(B)では流動曲線の折

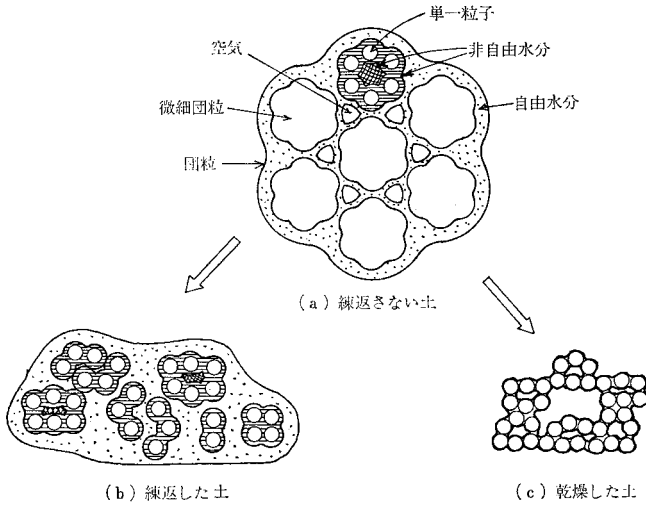


図-15 関東ロームの土構造モデル

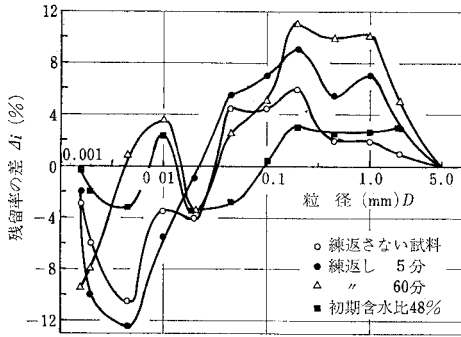


図-16 練返し、乾燥による粒度分布の変化(例)

れている付近から  $B$  値は増加しており、図-7 の  $w_c$  はわずかに減少、 $w_f$  は急増している。したがって、この付近からへらでの練返しによって団粒の破碎が活発化し、適度に細粒化するため保水力が増加するものと考えられる。この際図-15 に示すように微細団粒の一部が壊されるため非自由水の減少がみられるのであろう。このことは試験中の観察によると打撃による溝の閉じ方が折れ点より含水比の高い側では流動によるが、低い側では土塊がすべり落ちることによるもので、両者の状態にかなり相違があることから考えられる。非練返し(A)では試験経過中の団粒の破碎はまったく累積されないため  $B$  値はかなり小さく一定値を示している。

一方、図-7、8 の  $w_c$  のおのおのの値を比較すると乾燥過程の場合がもっとも大きい値を示している。これは比較的粗い団粒が適度に破碎され、新しい吸着面が生じるためと考えられる。このことは超音波処理により団粒を分解(単に団粒の破碎だけでいわゆる微細団粒まで破壊する練返しは生じていないと考えられる)すると L.L. 値、遠心含水当量が増加する<sup>25)</sup>という報告とも符合している。

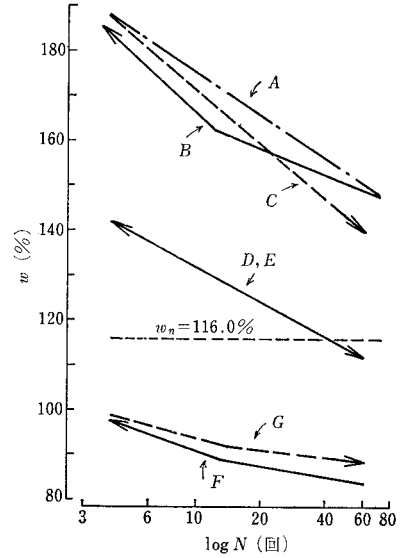


図-17 試験方法、試料の処理による流動曲線の性状の模式図

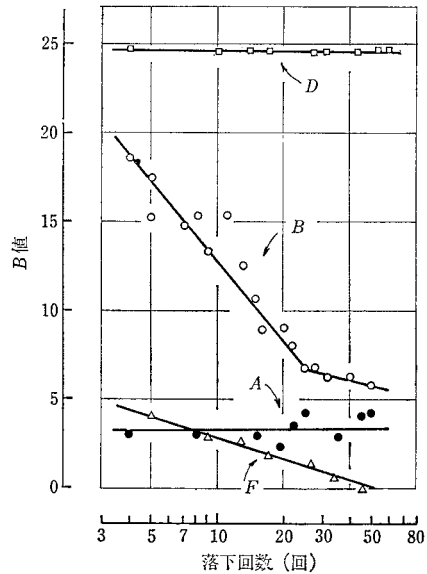
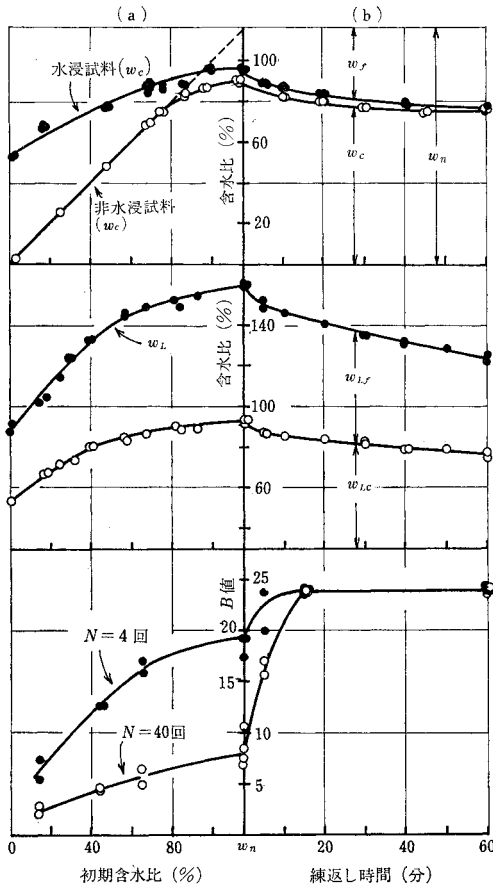


図-18 落下回数と  $B$  値の関係

乾燥試料(F,G)では  $B$  値、 $w_c$ 、 $w_f$  のいずれも他のケースに比べもっとも小さく、試験経過中の変化も少ない。これは図-17(c) に示すモデルのように乾燥によって非自由水が消失し団粒がある程度固結状態にあるため破碎が生じにくく、保水力も低下するためであろう(アロフェン自体の変質も考えられる)。

練返し試料(D, E)では  $B$  値は一定でその値は他のケースに比し特に大きく、また、 $w_f$ 、 $w_c$  は練返さない試料に比しかなり小さい。これは図-17(b) のモデルに示すように試験開始前にすでに団粒がほとんど破碎され



図一19 初期含水比、練返し時間と  $w_f$ ,  $w_c$ ,  $w_{Lf}$ ,  $w_{Lc}$ ,  $B$  値の関係

ており、いわば普通の粘土のような土性になっていたことによるのであろう。また、このような過多な練返しは微細団粒の構造まで壊すため非自由水の多くを消失させるとともに粒子の保水力も低下させるのであろう。

(3) 粒子破碎および含有水分の L.L. 値に及ぼす影響

図一19 に初期含水比 ( $w_c$ )、練返し時間 ( $t_k$ ) と試料の自由水量 ( $w_f$ )、非自由水量 ( $w_c$ )、L.L. 状態における自由水量 ( $w_{Lf}$ )、非自由水量 ( $w_{Lc}$ )、 $B$  値の関係を示す。初期含水比との関係を求めた (a) 図で非水浸試料の曲線と  $45^\circ$  の線 (点線で示す) との差が  $w_f$  を表わしている。 $w_0$  が  $70\sim 80\%$  以下で  $w_c$ ,  $w_{Lf}$ ,  $w_{Lc}$ ,  $B$  値の減少が激しい ( $B$  値の  $N=40$  と  $4$  回の差もこの付近から少なくなっている)。また、 $w_c$  は水浸試料においても自然含水比の試料より低い値となっている。したがって、 $w_0$  が  $70\sim 80\%$  以下において団粒の粗粒化による保水力の低下と非自由水分の消失などの現象が顕著となるのであろう。

(b) 図の練返しの場合、 $w_c$  は乾燥の場合と比べその量は少ないが減少しており、水浸させてもほとんどとに戻らない。 $w_L$ ,  $B$  値は  $t_k$  が  $10$  分までの間の変化量が多いようであるが、この範囲では図一15(b) に示すような団粒の破碎が顕著に生じているのであろう。このように関東ロームは準備する試料の練返しの回数によっては  $w_L$  が約  $40\%$ 、 $w_p$  が約  $20\%$  もの減少をすることがあるので、これを判別分類などに利用する場合は注意が必要であらう。

5. ま と め

関東ロームの工学的性質は複雑であり未解明な点が多々あるが、本論文はこの中のコンシステンシーの特異性について解明しようとしたもので、主たる要因と考えられる含有水分と団粒の破碎の面から実験的研究を行い考察を加えたものである。その結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 自然含水比で練返さない試料の流動曲線は加水過程では折線になるが乾燥過程あるいは試料を練返して使用しない方法では1本の直線となる。試験開始前に練返されている試料の場合も直線となる。

(2) 流動曲線が折線となる原因は折れ点付近から団粒の破碎量、自由水量が増え非自由水量がわずかに減少していることから、試験中のへらによる適度な団粒の破碎により保水性が増大することにあるといえる。このことは試料の非練返し使用あるいは練返し試料の場合は試験経過中の粒子破碎量、非自由水量がほぼ一定となっていることから裏づけられる。

(3) 関東ロームは乾燥により団粒が固結し、みかけ上粒度が粗粒化する。また、練返しにより団粒が破碎されみかけ上細粒化する。

(4) 初期含水比  $60\sim 80\%$  以下において L.L., P.L., P.I.,  $I_f$  の値が急激に減少する原因は非自由水の一部が消失することと、団粒の粗粒子化により保水力が低下し自由水分が減少することにある。

(5) 試験前の試料の練返しの程度に応じて L.L., P.L., P.I.,  $I_f$  の値はいずれも減少する。この原因は微細な団粒の構造まで壊されるため保水力が低下することと、それに伴って非自由水の一部が消失することにある。

(6) 関東ロームの保水力は団粒の状態によって左右され、自然含水比の練返さない状態でもっとも大きく、特に比較的粗い団粒を適度に破碎するとさらに大きくなる。また、練返し、乾燥の程度が多くなるほど減少する。

謝 辞：本研究の遂行ならびに常にご指導をいただ



いている中央大学の久野悟郎教授に深謝の意を表わします。また、実験の際に協力していただいた土木工学科の金井太一技官に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 茨木龍雄：関東ロームの工学的性質に関する研究（指数特性について），中央大学理工学部紀要，第10巻，pp. 32～40，1967.
- 2) 山崎不二夫・竹中 肇：風乾がアッターベルグ限界に及ぼす影響，農業土木学会論文集，第14号，pp. 1～14，1967.
- 3) 大崎順彦：Geotechnical Properties of Kanto Loam and Its Anisotropy，建築研究所報告，pp. 1～4，1957.
- 4) 池上政雄・立人幹郎：関東ロームの液性限界に対する練返しの影響について，研究の資料と記録（東大農学部農地工学研究室刊行誌），第15集，pp. 37～41，1966.
- 5) 箭内寛治：関東ロームのコンシステンシーにおける一斉試験，土と基礎，第17巻，第4号（134），pp. 33～38，1969.
- 6) 森 麟：関東ロームの物理的性質の試験結果に及ぼす超音波処理の影響，土と基礎，第19巻，第1号，pp. 36～40，1971.
- 7) 竹中 肇：関東ロームの非自由水分，農業土木研究，別冊7号，pp. 68～75，1963.
- 8) 高速道路調査会編：関東ロームの土工，pp. 69～71，共立出版，1973.
- 9) 久野悟郎・茨木龍雄：関東ロームにおけるランマーの突固めと土のこね返しの程度について，第2回土質工学研究発表会，II-4，pp. 191～194，1967.
- 10) 久野悟郎：土の締固め，技報堂，pp. 85～100，1963.
- 11) 久野悟郎・西堀高弘：関東ロームの含有水分に関する研究，土木学会第21回年次学術講演会講演概要集，pp. 32-1～32-2，1967.
- 12) 関東ローム研究グループ：関東ローム，pp. 340～349，築地書館，1965.
- 13) 美園 繁・木下 彰：土壌構造に関する研究，農業技術研究所報告，B-7，pp. 125～143，1957.
- 14) 山崎不二夫：土壌物理，養賢堂，pp. 34～43，1971.
- 15) 谷津栄寿：粘土と水との系，地学ノート（2），pp. 34～35.
- 16) 多田 敦・山崎不二夫：関東ロームの粒度分析（火山灰土の物理性の研究），農業土木研究，別冊第5号，pp. 19～21，1963.
- 17) 久野悟郎・飯竹重夫：土の含有水分とその締固めに及ぼす影響について，中央大学理工学部紀要，Vol. 12，pp. 19～34，1969.
- 18) 前掲 7)
- 19) Yasuo Kitagawa：The “Unit Particle” of Allophane，The American Mineralogist，Vol. 56，pp. 472～474，March-April，1971.
- 20) 倉林三郎・土屋龍雄：関東ローム層の粘土鉱物学的研究，粘土科学の進歩（2），pp. 178～196，1960.
- 21) 松尾新一郎・嘉門雅史：粘土の構造に関する用語について，土と基礎，第24巻，第1号，pp. 59～60，1976.
- 22) 浅川美利：土の物理的試験法の規格に対する推計学的検討，土木学会誌，40-8，pp. 50～55，1955.
- 23) 島 博保・井上洋司：関東ロームの比重測定誤差について，日本道路公団試験所報告，pp. 12～16，1966.
- 24) J. Marsal：Particle Breakage in Oarce Granular Soils，Proc. of 7th. I.C.S.M.F.E. Specialty Session No. 13，pp. 155～165，1969.
- 25) 前掲 6)

(1977.4.4・受付)