関東ロームのアロフェン含有量がその土質工学的特異挙動に及ぼす影響

(Influence of Allophane Contents on the Abnormal Engineering Behaviour of Volcanic Cohesive Soils)

宋 永 焜¹⁾ (Ei-Kon So)

キーワード：アロフェン含有量／液性限界／鋭敏比／オーバークompakション／関東ローム／強度回復／締固め／透水性／pF 曲線／分散 (IGC : D2/D9/D6)

1. 序 論

関東ロームは本邦の特殊土の一つであり、関東地方に広く分布する火山灰質粘性土である。この土は洪積世時代(200万年～1万年前)に富士、箱根火山群や愛鷹山などが噴火して推積された火山灰の風化土である。このような火山灰土は世界的にみてもハワイ、ニュージーランド、およびインドネシアにしか存在しない特殊土である。地質学的には地表面から下方に向かって立川ローム、武蔵野ローム(以上を新規ロームという)、下末石ローム、多摩ローム(古期ローム)の順に層序をもって推積し、立川ロームが最も新しく、以下順に古くなる^{1),6)}。

これらの層には、おのおの違った微細結晶である粘土鉱物を有している。立川ロームは、ほぼ地表面下5m以上に推積し、主として多量のアロフェン粘土鉱物を含有している。このため立川ロームは土質工学的に最も問題の多い土であり、人間生活に密着したローム層である。武蔵野ローム層以下からは、順次アロフェン量が減少し、代わりに加水ハロイサイト、およびハロイサイトなどの粘土鉱物が多くなる。このように深さにつれて変化する粘土鉱物の分布を表-1に示す^{1),2)}。アロフェン粘土鉱物は非晶質で直径約50Åの球状粘土鉱物³⁾である。その内部には多量の非自由水分(拘束水分)を有している⁴⁾。従来からこのアロフェン粘土鉱物の影響を定性的に暗示するような研究は少なくない。すなわち、立川ロームの乾燥密度は他のロームに比べて低く⁵⁾、加水ハロイサイトを多く含む

(アロフェン量が少ない)ものは鋭敏である³²⁾。また新しいロームほど攪乱土の強度は小さく、強度回復は大きい^{7),8),9),17)}などは、その一例である。よって、従来の説により、アロフェン粘土鉱物に帰因すると思われる土質工学的特異挙動を列挙すると次のようになる。

- (1) 高い自然含水比と液性限界を有している²⁾。
- (2) 液性限界などは空気乾燥やねり返しによって減少する^{4),10),11),12)}。
- (3) pF 曲線は空気乾燥によって変化する⁴⁾。
- (4) 粒度分析では塩酸による酸性分散のほうが有効である^{13),14)}。
- (5) 締固め曲線は初期含水比によってその位置を異にし、乾燥法、湿潤法の試料処理によって非可逆性を有している^{16),19)}。
- (6) 顕著なオーバークompakションおよび強度回復現象(シキソトロピー現象)を有する^{15),17),18)}。
- (7) 鋭敏比が大きく、攪乱土の強度は著しく低下する^{9),32)}。
- (8) 乱さない土の透水係数は乱した土より大きく、透水異方性を有する。また透水係数は間隙比に依存しない²⁾。

(9) アロフェン質関東ローム(立川ローム)は石灰、あるいは石灰-石膏混合材とよく反応し、加水ゲーレンナイト、エトリンガイトなどの反応生成物が安定処理に寄与している²⁰⁾。ただし多量の石灰添加量(>30%)が必要である²¹⁾。

以上のように地質学的、土壌学的、土質工学的に関東ロームに関する多数の研究が発表されている。しかしアロフェン量の影響に関する土質工学的な定量的研究は、本邦において、著者らの一連の研究^{22),23),24)}以外にはほとんどない現状にある。外国ではニュージーランドの火山灰について、Wesleyら^{25),26)}によりわずかに言及されているのみである。よって本研究は関東ロームのアロフェン含有量を化学的方法によって³⁰⁾定量し、推測の域を出なかった関東ロームの土質工学的特異挙動とアロフェン含有量の関係を定量的に求めようとするものである。このうち(1)に述べたアロフェン含有量と自然含水比、あるいは液性限界の関係については、おのおの直線関係を有していること(相関係数 $r=0.6\sim0.8$)が著者によってすでに報告されている^{22),23),24)}。また、(9)のアロフェン含有量が石灰安定処理土に及ぼす影響については別論文^{27),28)}において述べることにする。

2. 実験試料と実験方法

(A) 実験試料：関東ロームは主として、南関東ならびに東名高速改築沿線において採取したものである。乱さない試料は、 $\phi 5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ (直径×高さ)と $\phi 5\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ の円筒を用いて採取し、 q_u 試験、透水試験およびpF試験試料とした。いろいろなアロフェン量を有する試料はランダムに採取した後、アロフェン定量試験を

表-1 関東ロームの粘土鉱物分布

		主な粘土鉱物
立川ローム		アロフェン
武蔵野ローム	上部	アロフェンと低結晶の加水ハロイサイト 加水ハロイサイト
	下部	
下末石ローム	陸成 海成	加水ハロイサイト ハロイサイト鉱物の混合型
多摩ローム	陸成 海成	結晶度の高い加水ハロイサイト ハロイサイト鉱物の混合型

¹⁾ 関東学院大学工学部土木工学科 教授(横浜市金沢区六浦町4834)
(1993. 4. 21 原稿受付・討議期限 1995. 1. 1 要請があれば1か月の
期限延長可能)

表-2 関東ロームの物理的性質

年	採取地	Ap	w	ρ_s	w_L	w_P	I_P	$d < 2\mu$	$d < 74\mu$	$d < 420\mu$
		%	%	g/cm ³	%	%	%	%	%	%
4	東名1	40.0	85.80	2.642	124.0	79.0	45.0	14.2	35.4	58.1
4	東名2	39.0	55.18	2.867	86.2	60.3	25.9	0.0	25.8	50.2
4	東名3	35.0	39.0	2.808	78.8	64.0	14.8	5.9	14.3	32.4
4	美大	75.0	106.7	2.36	123.0	99.0	24.0			
4	能見台	22.0	36.0	2.44	49.0	35.3	13.7	6.1	66.3	95.5
4	上荻野	55.0	95.9	2.36	128.0	101.6	26.4	9.2	47.6	80.5
4	座間	20.0	105.4	2.45	104.2	71.3	32.9	7.5	46.3	77.8
4	沼津	66.0	181.5	2.88	177.0	76.2	100.8	2.8	10.6	37.1
4	東名1	17.0	72.4	2.95	89.4	57.6	31.8	7.8	29.5	58.0
4	町田	32.0	96.0	3.014	107.6	52.1	55.5	10.5	46.3	77.7
4	多摩1	51.0	78.8	2.91	96.0	76.7	19.3	7.5	37.4	69.9
4	多摩2	20.0	93.6	2.95	83.0	63.6	19.4	5.7	55.5	91.6
4	多摩3	30.0	92.9	2.96	95.8	65.6	30.2	10.3	46.0	71.7
4	多摩4	46.0	89.6	2.93	101.0	70.8	30.2	10.8	53.1	75.0
3	港北1	59.0	83.18	2.820	109.0	89.5	19.5	2.0	25.3	62.0
3	成瀬	38.0	105.07	2.849	113.8	95.7	18.1	9.0	39.4	71.6
3	秦野1	20.0	63.26	2.748	71.8	61.8	10.0	2.0	21.1	57.2
3	伊勢原	40.2	123.44	2.750	103.0	85.8	17.2	8.0	32.3	67.0
3	麻溝1	76.0	78.8	2.811	89.2	82.6	6.6	5.0	31.9	56.8
3	町田1	87.0	96.4	2.776	120.5	100.2	20.3	8.0	33.1	76.8
3	小田原1	62.0	134.8	2.860	153.7	139.2	14.6	10.0	32.0	70.0
3	大和	52.0	78.8	2.815	91.5	71.3	20.2	2.0	26.1	50.0
3	厚木	18.0	59.1	2.843	66.3	62.0	4.3	6.5	37.0	62.3
3	麻溝2	40.8	100.5	2.866	103.0	85.8	17.2	7.1	35.1	73.0
3	町田2	39.8	111.8	2.865	115.8	87.2	28.6	5.8	31.2	75.0
3	港北2	25.0	111.3	2.848	83.5	70.3	13.2	5.0	30.9	81.6
3	小田原2	64.0	127.3	2.863	120.5	100.2	20.3	8.0	33.6	70.3
3	秦野2	16.0	64.5	2.842	66.3	62.0	4.3	6.5	19.4	41.3

行なって選別した。代表的な関東ロームの物理的性質および粒度分布などを表-2に示す。

(B) 実験方法：(1)コンシステンシー限界、強熱減量、粒度分布、 q_u 試験は大むね土質工学会基準にしたがって行なった。(2)試料処理法の違いによる締固め試験を土質工学会基準に準じた以外は、すべてハーバード小型締固め試験機によって行なった。標準締固めエネルギーは3層×25回×2.5 kg (または40#ハーバード型タンパー)である。なお、強度回復現象試験のための供試体養生は、含水比保持のためパラフィンでシールし、湿潤箱に入れて所定日数養生した。(3)ねり返しテストは試料をビニール袋に入れ、ガラス板上に手でねりながら必要時間だけ行なった。(4)透水試験は $\phi 5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 円筒試料による簡易型変水位透水試験で行なった。(5)pFテストは広域圧力板法(pF=2.0~4.2まで連続測定可能)を用い、ほぼ土質工学会基準によって行なった。(6)アロフェン含有量の定量は、現在までまだ一定の基準法はないが、ここでは北川の8NHCl-1/2NNaOH、交互溶解法³⁰⁾によって行なった。その手順を図-1に、代表的な定量曲線を図-2に示した。この原理は次の通りである。土の酸およびアルカリに対する溶解速度は結晶性鉱物に比較して非晶質性鉱物(アロフェン)のほうがはるかに早い。ゆえに、土を適当な酸またはアルカリ溶液でくり返し処理した場合、土の非晶質鉱物成分の溶出含量は当初急激に増加し、それ以後は結晶性鉱物の溶出を示すゆるやかな直線的増加を示す。この溶解パターンを示す曲線の直線部分を延長して、y軸との交点を求めることによりアロフェン非晶質性鉱物の含有量を知ることができる。(7)X線回折試料は420 μ フルイ通過試料をメノウ針中で、十分細かくなるまですったものを使用した。X線回折の実験条件は表-3の通りであ

図-1 アロフェン定量フローチャート

図-2 アロフェン定量法曲線

表-3 X線回折の実験定数

試料	関東ローム	走査速度	2° min ⁻¹
対陰極	CuK α	チャート速度	2 cm min ⁻¹
フィルター	Ni	発散スリット	1°
管電圧	30 kV	受スリット	0.1 mm
管電流	20 mA	レンジ	5000 cps
時定数	1 s		

る。

3. 実験結果および考察

3.1 関東ロームのアロフェン量別による粘土鉱物の分布 (図-3)

表-1で示すように関東ロームは立川ロームなどの層序の変化とともに含有粘土鉱物の種類と量が変化する。地表の立川ロームには、多量のアロフェン粘土鉱物のみを含有している。それ以下は深さとともにアロフェン量は減少し、順に加水ハロイサイト、ハロイサイトと変化し、その分布境界には両者の混在物が存在することが知られている¹⁾。図-3は深さと無関係に採取した試料であるが、アロフェン量別に比較してみると、このような明瞭な傾向が存在することがわかる。すなわち、アロフェン含有量(以後Apと表記する)

図-3 関東ロームのX線回折図

65%以上ではアロフェン粘土鉱物しか存在しない。ちなみにアロフェン粘土鉱物の非晶質ピークは30°~40°間の幅広い小ピークで表されるものといわれている³⁰⁾。また $Ap=50\%$ では加水ハロイサイトの明瞭なピークしか存在しない。これに対し Ap が50%以下では、加水ハロイサイトのピークのはかに不鮮明ながらハロイサイトのピーク (20°) も存在する。一次鉱物である石英、長石のピークは、アロフェン量の減少とともに高くなる傾向にあり、従来からいわれていることと一致している^{1),2)}。定温、定圧の深い所では3次元構造の一次鉱物は風化しにくいことを示している。 $Ap=40\%\sim 50\%$ 層では、アロフェン、加水ハロイサイト、ハロイサイトなどの粘土鉱物が適当な割合で混在しているものと思われ、時としてアロフェン量との相関性から大きくはずれた挙動を示すことがある^{23),24)}。

3.2 アロフェン量が空気乾燥、ねり返し、強熱減量に及ぼす影響 (図-4~9)

アロフェン含有量は自然含水比、液性限界などと良好な直線比例関係を有していることは前に述べてきた。このうちアロフェン量と乱さない土の空気乾燥含水比の関係を時間を媒介変数として表したのが図-4である。ここでも自然含水比 (初日の含水比) はアロフェン量の増加とともに大きくなる。この自然含水比は、一般に自由水と非自由水に分けられ、後者は前者よりもかなり強い力で構造骨格の内部に吸着されているといわれている⁴⁾。ゆえに自由水の空気乾燥による消失は早く、非自由水は緩慢であることが考えられる。図-4をこのように考えていくと、 $Ap < 40\%$ の土の自由水の空気乾燥はほとんど瞬時のうちに消失し、それ以上のアロフェン量では14日で完了し、以後は緩慢な非自由水分の空気乾燥による消失であることがわかる。ただし、 $Ap=33\%$ 付近の含水比の減少は試料処理の不備によるものと思われる。14日以後の空気乾燥による消失量は $Ap < 40\%$ で約20%，それ以上の Ap 量で約30%であり、これをすべて非自由水分と考えると、自然含水比の1/3から1/4にあたる量である。関東ロームの非自由水分の重要性のほどがわかる。図-5は空気乾燥が液性限界に及ぼす影響を示したものである。一般に試料を自然含水比から段階的に空気乾燥させ、そのたびごとに

図-4 アロフェン含有量と空気乾燥含水比の関係

図-5 初期含水比と液性限界の関係

図-6 空気乾燥による pF 曲線の変化

試験をしてやると、液性限界はある空気乾燥含水比から低下し始める。この低下し始めた点に相当する空気乾燥含水比を一般に限界初期含水比 (w_{LL}) と呼んでいる¹⁰⁾。なお塑性限界にもこのような点が存在するといわれ、この場合には第2限界初期含水比 (w_{pL}) と名付けられている¹⁰⁾。図-5はいろいろなアロフェン量を有する土について、このような試験を行なった結果である。少し例外もあるが ($Ap=20\%$)、一般にアロフェン量が高いものほど限界初期含水比は高くなり、これに相当する液性限界も高くなる。液性限界試験は乱した土の状態量試験であるので Ap 量が高いほど攪乱による非自由水分の自由水化の度合いが大きくなる。すなわち、 Ap 量の高いものは、低いものより、外部から多くの水を加えられたことに等しい結果となる。図-6はいろいろなアロフェン量を有する関東ロームの空気乾燥による pF 曲線の変化である。空気乾燥をうけない土の pF 曲線はアロフェン量が多いほど高含水比側にある。また関東ロームを自然含水比から空気乾燥させていくと pF 曲線は乾燥側へ移動することが前から知られている⁴⁾。この図はこの傾向と一致するが、アロフェン量が多いほど移動量が多い。この移動はほぼ大から小へのアロフェン量の減少割合に応じて pF 曲線が乾燥側へ移動していることがわかる。図-7は、図-6 から $pF=4.2$ (非自由水分)、及び $pF=3.0$ (準非自由水分) に相当する含水比を読みとって縦軸とし、対応するアロフェン量を横軸にプロットしたものである。この図から自然含水比の土、空気乾燥土ともに、その非自由水分はアロフェン含有量とともに増加し、両者はほぼ直線関係にあることがわかる。以上のことからアロフェン粘土鉱物が関東ロームの空気乾燥挙動を支配し、非自由水分の吸着に多大の影響を及ぼしていることがわかる。図-8は、いろいろなアロフェン量を有する試料について、そのねり返し時間と液性限界の変化の関係を示したものである。一般に関東ロームは、ねり返し時間が長くなるほど液性限界は低下することが報告されている^{11), 15)}。図-8は、アロフェン量が多いほど、ねり返し時間とともに液性限界が顕著に低下していることを示している。また、液性限界の低下はあるねり返

図-7 アロフェン含有量と非自由水の関係

し時間で一定になるが、この時間もアロフェン量が多いほど長くなる。この現象は、空気乾燥による液性限界の低下と同じく、ねり返しによるアロフェン粘土鉱物の保持する非自由水分の非可逆的自由水化によるものである⁴⁾。低アロフェン量 ($Ap=20\%$) ではこの自由水化現象が顕著でないため、ねり返しによる液性限界の低下はほとんど起こらない。図-9は、アロフェン含有量と強熱減量の関係である。両者の間には、次式で表される直線比例関係を有している。

図-8 アロフェン量がねり返しと液性限界の関係に及ぼす影響

図-10 懸濁液のPH値と均等係数の関係

図-9 アロフェン量と強熱減量の関係

$$L_{ig} = 0.14A_p + 6.23$$

$$r = 0.638$$

(1)

式中の記号は図に示すとおりであり、 r は相関係数である。アロフェン量は地表に近づくほど増加することは、図-3のX線回折、後述の図-23で示されるアロフェン量と乾燥密度の関係から推測できる。また地表に近いほど植生の影響を受け、有機物が多くなることは、黒ボク土の存在がこれを示している。これからアロフェン含有量と強熱減量の間にはある一定の比例関係があることがわかる。式(1)はこの関係を示している。なお、図-9から関東ロームの強熱減量は20%以内にあるが、これは従来から報告されているものと一致する¹⁴⁾。

3.3 アロフェン量が分散作用に及ぼす影響 (図-10~11)

土の粒度分析における懸濁液の分散には、従来から苛性ソーダ、ケイ酸ナトリウム、およびピロリン酸ナトリウムなどの試薬が使用されてきた。しかし、アロフェン型ロームである関東ロームには酸性分散が効果的といわれている^{13),14)}。同一種類の土について分散度を比較するのに沈積粘土分量で表す方法がある¹¹⁾が、土質工学的には均等係数で表す方が適当と思われる。図-10は、いろいろなアロフェン量を有する関東ローム試料の懸濁液について、均等係数

図-11 アロフェン量と均等係数の関係

と1規定塩酸を添加したpH値の変化についてプロットしたものである。この図から、pH値のいかに関わらず、アロフェン量が増えると均等係数が大きくなるのがわかる。すなわち、アロフェン量が増えると酸性分散の効果が大きくなる。またアロフェン量のいかに関わらず、均等係数が最大になる懸濁液の最適pH値は3~4の間にあることがわかる。pH=3~4になる1NHClの添加量は、任意のアロフェン量に対して約15~20ccである。しかし、同

一量の 1NHCL 添加に対しては、アロフェン量が増えるほど pH 値は小さくなることが確かめられている。図-11は、酸性分散を含むいろいろな分散材の種類がアロフェン量と均等係数の関係に及ぼす影響を表したものである。苛性ソーダ (NaOH) によるアルカリ分散ではかなりのバラツキがあり、あまりアロフェン量とは関係ないようである。しかし、酸性分散ではかなりの相関性がみられる。アロフェン量60%まではヘキサメタリン酸による分散が効果的であり、それ以上になると塩酸による分散が卓越してくることがわかる。また塩酸による分散効果はアロフェン量の増加とともに急増す

る。この間、均等係数はほぼ10から100に増加し、アロフェン量によって10倍の開きがあることがわかる。すなわち、塩酸による分散は高アロフェン量を有する関東ロームについてのみに有効である。

3.4 アロフェン量が締固め曲線に及ぼす影響 (図-12~13)

アロフェン含有量が締固め曲線に影響を及ぼすことは、早くから地質学的な層序の違いによる締固め曲線で定性的に指摘されている^{5),15)}。すなわち、締固め曲線の順序は層序と一致し、新期ローム (Ap 量大) の乾燥密度は古期ローム (Ap 量小) のものより小さく、立川ロームの乾燥密度が最小であるというのがそれである。またハ

図-12 アロフェン量が締固め曲線に及ぼす影響

図-13 試料の処理法が締固め曲線に及ぼす影響

ロイサイトなどを含む粘土化の進んだ古期ロームは、湿潤法締固め過程においてもピークが存在し、乾燥法締固め曲線との間に可逆性を有しているともいわれている⁷⁾。粘土化の進んだ古期ロームのアロフェン含有量はゼロか微量である。以上のことから関東ロームのアロフェン含有量が、定性的にも締固め挙動に多大な影響を及ぼすことが推察できる。よって、いろいろな締固め挙動がアロフェン粘土鉱物量によってどのような影響を受けるか、それを定量的に示したのが図-12と図-13である。

乾燥過程による関東ロームの締固め曲線は、初期含水比によって変化する。そこでこの初期含水比をほぼ30%に固定して、いろいろなアロフェン量を有する試料について締固めた結果が図-12である。アロフェン量が大きくなるにつれて締固め曲線は急な山形曲線から平坦な曲線になり、乾燥密度もそれに応じて低下していることがわかる。全試料の最大乾燥密度は、ほぼ0.95から0.65 g/cm³の間にあり、平均は0.8 g/cm³である。農業分野の火山灰土の国際的分類基準では、乾燥密度が0.85 g/cm³以下のものを火山灰土としている³¹⁾。これはほぼアロフェン量40%以上のものに相当し、農業上の火山灰土はアロフェン型ロームを対象にしていることがわかる。しかし、工学的にはアロフェン量40%以下のものも少なくない。アロフェン量が増えるにつれて乾燥密度が低下する締固め挙動は、一般土において粘土分が増える場合の傾向と類似している。この限りにおいてアロフェンは粘土として作用していることになる。しかし、アロフェン量は粘土鉱物であるけれども、いつも粘土の挙動を示すとは限らない。アロフェン量は関東ロームの粘土分と比例しないことがその一例である²⁹⁾。図-13は初期含水比を約40%に固定し、大中小のアロフェン量を有する試料について、試料の処理法の違いによる締固め曲線への影響を調べたものである。ここで試料処理法の違いとは、乾燥繰り返し法(a法)、乾燥非繰り返し法(b法)、湿潤法(c法)、ならびに湿潤過程での初期含水比の違いによる締固め挙動をいう。まず乾燥繰り返し法(a法)と湿潤法(c法)の比較では、アロフェン量が大きくなるほど両者の非可逆性が大きく、逆にアロフェン量が小になるほど両曲線の相似性がよくなることがわかる。この極限は、アロフェン量ゼロになった一般土で、この場合は両者が完全に一致し、可逆性を有している¹⁹⁾。これはまたハロイサイト化した下末石ローム層以下の関東ロームの挙動でもある。また試料の繰り返し使用(a法)と非繰り返し使用(b法)の比較では、前者による乾燥密度は、後者によるものよりも大きくなる傾向にある。しかし、アロフェン量の影響についてはあまり明瞭な差異は認められない。一方、湿潤過程でのおおのの初期含水比から締め始める挙動では、締固め曲線の乾燥側と湿潤側で明瞭な差異を生じている。すなわち、アロフェン量のいかんに関わらず、乾燥側では初期含水比が小さいほど曲線は上位に位置し、湿潤側ではほぼゼロ空気間隙率曲線に沿って移動していることがわかる。この場合でも、ほぼアロフェン量40%で乾燥密度が0.85 g/cm³である。

3.5 アロフェン量がオーバーコンパクションに及ぼす影響 (図-14~16)

関東ロームは一般土に比べてオーバーコンパクションになりやすいことは、その特異的な性質の一つとしてつとに知られている¹⁶⁾。図-14はオーバーコンパクション特性を調べるために用いた試料の標準締固め曲線(3層×25回×40#ハーバード型)である。図-12などと同様に、アロフェン量が大きくなるとともに乾燥密度が低下する正常な挙動を示している。この標準締固めのほかに、オーバーコンパクションをも含めた、いろいろの異なるエネルギーで締固めた

曲線のアロフェン量と最大乾燥密度の関係を示したのが図-15である。これからアロフェン量とは無関係に締固めエネルギーが大きいほど最大乾燥密度も大きくなり、過度のエネルギーによる最大乾燥密度の減少はみられない。つまり、最大乾燥密度に関しては、字義どおりのオーバーコンパクションは存在しない。図-16はアロフェン量のオーバーコンパクションに及ぼす影響を示したものである。Ap=20%付近でやや異常挙動を示すが、一般にアロフェン量のいかんに関わらず、エネルギーの増加とともに q_u は増加し、55回で25回とほとんど同じになるまで q_u は低下する。すなわち、オーバーコンパクションは、アロフェン量と無関係に55回で起こる。この理由は次のように考えられる。図-15にみられるように締固め回数25回と40回の間の乾燥密度の増加は小さく、間隙の減少による

図-14 オーバーコンパクション試験試料の締固め曲線

図-15 いろいろなエネルギーで締固めた試料のアロフェン量と最大乾燥密度の関係

図-16 アロフェン量のオーバコンパクションに及ぼす影響

密度の増加は限界に達したことを示している。しかし、回数を55回に増やすと乾燥密度は急増している。この間の乾燥密度の増加は、締固め攪乱による非自由水の自由水化、団粒の破壊などにより高密度化されたものと考えられる。この自由水の増加は、同時に図-16で示される55回締固め供試体の q_u の減少となって現われている。つまり、関東ロームのオーバコンパクション現象は、主としてアロフェン粘土鉱物の非自由水の自由水化による含水比の増加とそれに伴う q_u の減少によるものであることがわかる。しかし、アロフェン量の差によるオーバコンパクションの程度に及ぼす影響はあまりみられない。すなわち、アロフェン量はオーバコンパクションに無関係である。

3.6 アロフェン量が強度回復（シキソトロピー現象）に及ぼす影響（図-17～19）

関東ロームは、前述のオーバコンパクションのほかに顕著な強

図-17 アロフェン量が強度回復に及ぼす影響

度回復現象を有することは、早くから指摘されている¹⁷⁾。図-17はアロフェン量が、この強度回復現象に及ぼす影響を示したものである。この図からアロフェン量のいかんに関わらず、 q_u は養生とともに増加し、14日ではほぼ一定になる。強度回復が14日で終了することは、過去の研究とも一致している¹⁷⁾。この強度回復現象は、締固めにおけるこね返しが非自由水を自由水化し、さらに静置養生することによって再び非自由水にもどる硬化現象であると考えられている。この非自由水には不可逆的な構造的な非自由水と可逆的な溶媒和非自由水があり、強度回復において作用するのは後者の可逆的な非自由水であるとされている⁴⁾。図-17は正常締固め供試体 ($n=25$ 回) についてのものであるのに対して、オーバコンパクションになる締固め回数55回の供試体の強度回復を示したのが図-18である。この図からオーバコンパクションになっても、アロフェン量と無関係に14日で強度回復が終了していることがわかる。すなわち、強度回復現象はオーバコンパクションに無関係である。図-19はオーバコンパクションを含むいろいろな締固めエネルギーで締固めた供試体について、アロフェン量と強度回復率の関係を示したもので

図-18 オーバコンパクション供試体の強度回復

図-19 アロフェン量が強度回復率に及ぼす影響

ある。ここで

$$\text{強度回復率} = \frac{\text{養生14日の強度 } (q_{14})}{\text{養生ゼロ日の強度 } (q_0)} \times 100\% \quad (2)$$

で表す。

q_u 供試体作成時の不備によるものと思われる少しのバラツキはあるが ($A_p=20\%$)、この図から正常締固め状態では、アロフェン量が増えると強度回復率は増加し、オーバーコンパクション状態では ($n=55$ 回)、逆に減少することがわかる。従来から、新期ローム (A_p 量大) ほどその強度回復は大きいといわれている⁸⁾が、この図はそれを定量的に裏付けるものである。 $n=25$ 回の標準締固めでは、原強度の約1.5~2 倍の強度回復があり、アロフェン量の違いによる強度回復率の差は30%になる。オーバーコンパクションでの強度減少率の差も同じく30%である。以上のようにアロフェン含有量はオーバーコンパクションと強度回復時間とは無関係であるが、強度回復率とは密接な関係を有することが結論付けられる。

3.7 アロフェン量が鋭敏比に及ぼす影響 (図-20~21)

乱さない状態の関東ロームは、一般に10 m 近くまで斜面の自立可能であり、支持地盤としては3~4 階建物の荷重に十分耐えることが知られている²⁾。しかし基礎地盤の攪乱による支持力の低下(杭打ちなど)、盛土のねり返しなどによるトラフィカビリティ確保の困難性を引き起こすことなどは、関東ロームの鋭敏比の重要性を示すものである。一般に関東ロームの鋭敏比は高く、10以上といわれている^{9), 32)}。図-20は、いろいろなアロフェン量を有する関東ロームの乱さない土と乱した土の一軸圧縮強度 (q_u) の変化を示したものである。乱さない土の q_u は78.4~383 kN/m² (0.8~3.8 kgf/cm²) と幅広く、注目すべきは、アロフェン含有量の増加とともに増加していることである。 q_u に関する限り、アロフェン粘土鉱物は粘土の挙動ではないと考えることができる。この現象はボーリングデータによっても報告されている²⁹⁾。関東ロームの乱さない土の強度は、その多孔構造、毛管力、および適度の粘着力によるものとされている^{2), 4), 31)}。このうちでもアロフェン粘土鉱物は粗の多孔構造と粘着力に大きく寄与しているものと思われる。多孔構造は本来砂質土の特性である。アロフェンロームが完全に粘土挙動を示さない理由がここにもある。図-21は図-20から計算された鋭敏比とアロフェン量の関係である。両者はほぼ比例関係にある。鋭敏比は6以下であり、従来からいわれているほど高いものではない。表-1に示すように関東ロームは地質学的には地表から地下に向かって新期ロームから古期ロームへと変化している。一般に地表の新期ロームはアロフェン量が多く、古期ロームはほとんどない代わりによく粘土化されている。一般に高い鋭敏比を示すものは深層にあるこれらの完全に粘土化された古期ロームである。これらの古期ロームはアロフェン量が少なく、代わりに粘土化の産物である加水ハロイサイト、ハロイサイトなどを含んでいる。加水ハロイサイトのみを多く含有する灰土の鋭敏比が高いことが報告されている³²⁾。これから関東ロームの高い鋭敏比を支配しているものはアロフェン粘土鉱物でなく、ハロイサイトなどの深層粘土鉱物であるといえる。図-21ではアロフェン量30~50%の間で高い鋭敏比を示すバラツキがあるが、アロフェン量が低いところでは、加水ハロイサイトが多くなるので、この影響によるものと思われる。

3.8 アロフェン含有量が透水性に及ぼす影響 (図-22~23)

関東ロームの透水性に関して、現在まで知られている一般的知見は、乱さない土の透水係数は乱した土より大きく、約 10^{-2} ~ 10^{-3} cm/sec のオーダーである。これは乱さない土が粗い間隙に富むことによるものであるが、乱されるとこの団粒構造が破壊されるためである²⁾。この構造の重要性のため関東ロームの透水性は、単に間

図-20 アロフェン量と一軸圧縮強度の関係

図-21 アロフェン量と鋭敏比の関係

隙の大きさに依存しない。またその層に垂直方向の透水性は水平方向のものよりも数倍も大きい透水異方性を有している²⁾。これは垂直方向のき裂が水平方向のものよりも発達しているためである。しかし、これらの通説もアロフェン量と乾燥密度を規定しない限り、一定しないものがあると考えられる。一方、関東ローム層の建設現場では、トレンチ内などの雨水の排水性が場所により大きな差異があることが経験的に知られている。この原因は地盤のアロフェン含有量の差によるものと考え、著者は一連の透水試験を行ってきた。アロフェン量と透水性の関係について考えられる問題には次の4点がある。

- (1) 乱さない土のアロフェン量と透水係数の関係

(2) アロフェン量のいかんを問わず、すべての試料を同一乾燥密度に締固めた時の透水性の比較(乱した土のアロフェン量と透水係数の関係)

(3) アロフェン量別の締固め曲線に応じた最適含水比で締固めた場合のアロフェン量と透水係数の関係

(4) 一定のアロフェン量を有する試料について、乱さない土の乾燥密度と同じくした締固め供試体の透水係数の比較(乱した土と乱さない土の比較)

このうち、第(1)点について、乱さない土のアロフェン量と透水係数の関係を示したのが図-22中の点線である。ややバラツキはあるがアロフェン量の増加につれて乱さない土の透水係数も大きくなり、 10^{-4} ~ 10^{-6} のオーダーにある。この理由は次のように考えられる。一般にアロフェン量は地下から地表に向かって増加している、また乾燥密度も自重による上載荷重の減少により、地下から地表に向かって減少しているため透水性は同方向に増加する。ゆえに図-23に示すようにアロフェン含有量が増えると乾燥密度は減少する傾向にある。すなわち、アロフェン量が増加するにつれて透水係数も増加することになる。また図-23で知れるようにアロフェン量40~50%から乾燥密度が急激に低下するので図-22では乱さない土の透水係数もこの付近で急に増加することがわかる。アロフェン量

が40~50%付近で透水性が急変することは、著者によってすでに報告されてきた^{23),24)}。第(2)点では、すべての試料を同一乾燥密度に($\rho_d=0.66$)締固めた時の透水性を比較する問題であるが、これは図-22中の実線で示されている。透水係数はアロフェン量の増加とともに減少している。締固めにより、乱さない土特有の団粒構造が破壊され、アロフェン粘土は粘土本来の挙動に転ずるためと考えられる。一般に粘土分が多いほど締固めの透水性が減少するので、乱されたアロフェン粘土はこれに類似した挙動となる。(3)の問題ではアロフェン量が増えると締固め曲線は平坦になり、乾燥密度は低下するので、それに対応した最適含水比で締固めた供試体の透水係数は当然増加する。すなわち、この場合は(1)と同様にアロフェン量の増加とともに透水係数は増加することは著者によってすでに報告されている^{23),24)}。また(4)では、一定のアロフェン量を有する試料に対して、同一密度を有する乱した土と乱さない土の透水性の比較であるが、空気乾燥しない限り乱した土には粘土の挙動が現われるので、通説のように乱さない土の透水係数は乱した土より大きくなる。しかし、空気乾燥土では、空気乾燥の程度によりこの限りではない。一般に空気乾燥すると透水係数は増加する傾向にある。

4. 結 論

以上の研究結果から次のような結論が得られる。

(1) アロフェン量が減少するとともに順次加水ハロイサイト、ハロイサイトが増加する。加水ハロイサイトはアロフェン量50%以下になって始めて混在する。

(2) アロフェン量の増加とともに自然含水比は増加し、自由水の空気乾燥は14日で完了する。

(3) アロフェン量が大きくなるにつれて、空気乾燥による限界初期含水比およびpF曲線の乾燥側移動量はともに大きくなり、またねり返しによる液性限界の減少も大きくなる。

(4) アロフェン量と強熱減量、またはpF=4.2の非自由水分とは、おのおの正の直線関係にある。

(5) 高アロフェン型ローム($A_p > 60\%$)は酸性分散の方が有効である。有効なpH値は3~4の間にある。

(6) アロフェン量が増えると締固め曲線は平坦になり、乾燥密度は低下し、乾燥、湿潤法間の締固め曲線の非可逆性が大になる。

(7) オーバーコンパクションは締固め回数55回で起こり、アロフェン量に無関係である。しかし、締固め供試体の強度はアロフェン量の増加とともに減少する。

(8) 強度回復現象は14日で終了し、この時間はアロフェン量やオーバーコンパクションと無関係である。

(9) アロフェン量が増加するにつれて強度回復率は増加し、オーバーコンパクション供試体では逆にその強度回復率は減少する。

(10) 乱さない土の q_u と鋭敏比はアロフェン量とともに増加するが、非アロフェン粘土の鋭敏比はほど高くない。

(11) 乱さない土の透水係数はアロフェン量とともに増加し、特に40~50%以上で透水性の増加が著しい。同じ乾燥密度に締固めたものは、逆にアロフェン量の増加とともに減少する。

本研究は、この4~5年来、土質工学会研究発表会などで発表したものも含めて、とりまとめたものである。最後に本論文の作成にあたり、関東ローム試料の採取に多大の御協力をいただいた清水建設横浜支店土木部長坂丸一郎氏、ならびに鹿島建設土木本部次長

図-23 乱さない試料のアロフェン量と乾燥密度の関係

村田晔昭氏に感謝の意を表して止まない。また、実験の一部を担当した列届宋研究室の大学院生および学部卒研究生諸君の努力に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 関東ローム研究グループ (1965): 「関東ローム」, 築地書館。
- 2) 高速道路調査会 (1973): 「関東ロームの土工—その土質と設計施工」, 共立出版。
- 3) 北川靖夫 (1975): アロフェンの脱水, 微細形態および化学組成, 「農技研報告」, B26, pp. 95~131。
- 4) 山崎不二夫・須藤清次 (1965): 土の工学的挙動—関東ロームを中心として, 「農土論集」, No. 14, pp. 1~10。
- 5) 三島史郎・里木荘平 (1968): 関東ロームの地質工学的研究, 「第3回土質工学研究発表会」, pp. 17~22。
- 6) 多田 敦・山崎不二夫等 (1965): 関東ロームにおける新期ロームと古期ロームの物理的性質の比較, 「農土論集」, No. 14, pp. 67~70。
- 7) 土壌物理研究会編 (1979): 特殊土の物理的性質 (「土の物理学」, 第12章) 森北出版, pp. 311~330。
- 8) 土質工学会 (1974): 火山灰質粘性土 (「日本の特殊土」, 第2章), pp. 22~83。
- 9) 吉国 洋等 (1984): 火山灰質粘性土 (「土の力学Ⅱ」, 技報堂出版, pp. 3~33。
- 10) 相馬尅之 (1978): 初期含水比が土の液性塑性限界に及ぼす影響, 「土壌の物理性」, No. 38, pp. 16~22。
- 11) 飯竹重夫 (1978): 関東ロームのコンシステンシー特性について, 「土木学会論文報告集」, No. 277, pp. 85~93。
- 12) 山崎不二夫・竹中 肇 (1965): 風乾がアッタベルク限界に及ぼす影響, 「農土論集」, No. 14, pp. 46~48。
- 13) 多田 敦 (1965): 火山灰土の粒度分析の問題点, 「土質工学会第10回シンポジウム」, pp. 23~26。
- 14) 土質工学会 (1990): 「土質試験の方法と解説」 (第2章関東ローム), pp. 496~508。
- 15) 安富六郎・竹中 肇 (1970): 関東ロームのねり返しによる工学性の変化について, 「関東ロームに関するシンポジウム」, pp. 17~20。
- 16) 久野悟郎 (1964): 「土の締固め」, 技報堂, pp. 85~100。
- 17) 島 博保 (1970): 関東ロームの強度特性について, 「関東ロームに関するシンポジウム」, pp. 21~28。
- 18) 持永龍一郎, 里木康夫 (1970): 灰土 (阿蘇火山灰土) の土性について, 「関東ロームに関するシンポジウム」, pp. 69~74。
- 19) 多田 敦 (1965): 関東ロームの締固めと透水係数について, 「農土論集」, No. 14, pp. 30~45。
- 20) 有泉 昌・牧 隆正 (1964): アロフェン質粘土の消石灰—石膏による化学的安定処理方法に関する研究 (6), 「土木研究所報告」, No. 122, pp. 35~60。
- 21) 日本石灰協会 (1970): 「石灰による土質安定処理工法」, 山海堂, pp. 1~35。
- 22) E. K. So and F. Okada (1988): "The physicochemical properties of residual strength of volcanic soils in Japan," Proc. Intern. Conf. Eng. Problems of Regional Soils, Beijing China, pp. 701~706。
- 23) 宋 永焜 (1991): 関東ロームのアロフェン量と土質工学的性質の関係, 「粘土鉱物試験結果の活用シンポジウム発表論文集」, 土質工学会, pp. 61~66。
- 24) 宋 永焜 (1991): 火山灰粘性土のアロフェン量が工学的性質に及ぼす影響, 「材料」, Vol. 40, No. 459, pp. 9~15。
- 25) Wesley, C. D. (1973): "Some basic engineering properties of halloysite and Allophane Clays in Java Indonesia," Géotechnique Vol. 23, No. 4, pp. 471~494。
- 26) Wesley, C. D. (1977): "Shear strength properties of Halloysite and Allophane Clay in Java Indonesia," Géotechnique Vol. 27, No. 2, pp. 125~136。
- 27) 宋 永焜 (1993): 関東ロームのアロフェン含有量が生石灰安定処理土の含水比に及ぼす影響, 「第28回土質工学研究発表会」, pp. 2593~2594。
- 28) 宋 永焜等: 関東ロームのアロフェン含有量が生石灰—石膏安定処理土に及ぼす影響, 「土質工学会論文報告集」, 投稿中。
- 29) 窪田すみ江・金井太一・飯竹重夫 (1993): 南関東に分布する新期ロームのアロフェン含有量, 「土木学会第20回関東支部技術研究発表会概要集」, pp. 270~271。
- 30) 北川靖夫 (1977): 土壌中のアロフェンおよび非晶質無機成分の定量に関する研究, 「農技研報告」, No. 29, pp. 1~48。
- 31) 前田 隆・相馬尅之 (1983): 火山灰土の物理性と工学性 (日本土壌肥料学会編, 4, 「火山灰土」, 博友社), pp. 99~139。
- 32) 喜田大三・中田礼喜 (1970): 火山灰土の pF 水分に関する二, 三の知見, 「関東ロームに関するシンポジウム」, pp. 39~44。