

## 火山灰質粘性土のアロフェン含有量がその物理的性質 に及ぼす影響

宋 永 焜

### Influence of Allophane Content on the Physical Properties for Volcanic Cohesive Soil

Ei-Kon So

Faculty of Engineering, Kanto-Gakuin University

#### Abstract

Relationship between allophane content and physical properties for volcanic cohesive soil was investigated. The main results are as follows

1. Allophane clay minerals are the main factor for forming ped structures.
2. Acid dispersion is more effective than alkali dispersion when the allophane content is above 50%.
3. Natural water content, liquid limit, non-free water content and natural void ratio increasing linearly with allophane content respectively.
4. Volcanic cohesive soil lies below A-line in plasticity chart and fall more far from the A-line with increasing allophane content. The soil has its characteristic linear line in the chart.
5. Compacted dry density decreases linearly with increasing allophane content.

**Key words** : Kanto loam, allophane content, ped structures, physical property, compaction curve

#### 1. はじめに

火山灰質粘性土は本邦の首都圏に広く分布し、その代表的なものが関東ロームとして知られている。地質学的には地表面から地下に向かって立川ローム、武蔵野ローム、下末吉ローム、および多摩ロームの順に層序をもって堆積している。そのうちでも立川ロームが最も年代的に新しく、以下順に古くなる。これらの層には、おのおの違った不完全または完全結晶質である微細粘土鉱物を有している（関東ローム研究グループ、1965）。立川ロームはほぼ地表面下3m以上に堆積し、多量のアロフェン粘土鉱物のみを含有している。武蔵ローム層以下からは、順次アロフェン量が減少し、代わって球状または針状の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。このうち立川ロームと武蔵ロームは堆積年代が比較的新しく、かつアロフェン粘土鉱物を含んでいるので新期ロームまたはアロフェン質火山灰土とも呼

ばれる。これに対し下末吉ロームおよび多摩ロームは古期ロームと称している。アロフェン質火山灰土が団粒を形成して存在することは、古くから土壌学の分野で知られている。またこの団粒は階層を有して存在している。すなわち数百個のアロフェンの集合によって数百Åの一次団粒が形成され、それが更にマイクロメートル単位の二次団粒、ミリメートル単位の三次団粒へと逐次成長していくことである。団粒形成の原因はアロフェン内の粘質の和水アルミニウム、土中の酸化鉄、有機質、および植物の根の吸水による土の圧縮作用によって形成される（岩田、1989）。この団粒構造によって乱さないアロフェン質火山灰土は、沖積粘土に比べて比較的大きな間隙比と透水性を有している。

第二次大戦後からこのアロフェン粘土鉱物が関東ロームの高含水比および鋭敏性などにみられる地盤工学的特異挙動の原因であることが定性的に知られるようになってきた（高速道路調査会、1973）。著者はこの両者の定量

的關係について、いくつかの知見を発表してきた(宋, 1993, 1994)。これらの研究によって関東ロームの地盤工学的性質がアロフェン含有量によって著しく変化することが明らかになってきた。すなわち関東ロームのうちでもアロフェン質である新期ロームは火山灰の特異挙動を示すのに対し、非アロフェン質古期ロームは沖積粘土的挙動をとる違いを有することである(宋, 1998)。具体的に火山灰特異挙動について言えば、乱さないアロフェン質火山灰土が団粒構造の形成によってますます安定し、乱された地盤は逆に団粒構造の破壊と非自由水の自由水化によってトラフィカビリティー確保の困難な軟弱土と化することである。過去において関東ロームを主とする火山灰質粘性土に関する多数の研究が地質学的(関東ローム研究グループ, 1965)、土壌学的(前田ら, 1983)、および地盤工学的(地盤工学会, 1974)になされてきた。しかしアロフェン量との定量的な広範な工学的研究は、著者以外にはほとんどないのが現状である。特にアロフェン量と物理的性質の関係については、本邦内外を問わずごく限られたデータについての過渡的な研究しかない段階にある(Maeda *et al*, 1977, Warkentin *et al*, 1974, Wesley, 1973)。

本研究は著者が最近十数年にわたって採取した多くの試料についての試験結果である。すなわちアロフェン量と団粒構造およびその分散性、指数的性質、乱さない土の物理的性質と締め固め曲線の性質について、統計的分析を行った結果の報告である。

## 2. 実験試料と方法

### 1) 実験試料

実験試料は東京、神奈川県を中心として関東南部および西部一帯において採取した火山灰質粘性土(関東ローム)を用いた。採取現場は主として企業工事現場、東名高速改築沿線、および住宅都市整備公団の宅地造成地などである。乱さない試料は5cmφ×5.1cm(100cm<sup>3</sup>)の円筒を使用して、ブロックサンプリング法によって採取したものである。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によって選別した。多数の試料を詳細に明示するのは、紙数の制約上困難であるため、最近の代表的試料についてのみ、その物理的性質を表-1に示す。また本論文における大部分の図表そのものが試料の基礎的性質に関するものであるため、表-1の内容は最小限に止めている。なお長い研究期間において、実験設備の有無の差や採取年次の異なる試料を用いたため実験試料数に変動がある。

### 2) 実験方法

下記の特殊試験以外は、主として地盤工学会基準による(地盤工学会, 1991)。

#### (1) アロフェン定量試験

北川の8mol/l HCl-1/2mol/l NaOH交互溶解法によって行った(北川, 1977)。その原理は結晶質粘土鉱物に比べてアロフェンのような非晶質なものは、酸とアルカリの交互溶解によって迅速に減量されることによるものである。

表-1 代表的実験試料の物理的性質

Table 1 Typical index properties for volcanic cohesive soils

採取地	アロフェン含有量 A <sub>p</sub> %	自然含水比 W <sub>n</sub> %	密度 ρ <sub>s</sub> g/cm <sup>3</sup>	液性限界 W <sub>L</sub> %	塑性限界 W <sub>P</sub> %	塑性指数 I <sub>p</sub> %	液性指数 I <sub>L</sub>	強熱減量 L <sub>ig</sub> %	pH
長津田(上)	66.0	125.8	2.841	169.6	113.0	56.6	0.23	17.4	6.13
長津田(下)	15.0	42.6	2.725	54.8	28.6	26.2	0.53	9.6	6.47
北公園	68.0	133.5	2.865	158.4	108.9	49.5	0.50	16.8	6.11
川上	22.0	89.0	2.818	117.4	70.3	47.1	0.40	13.3	5.90
温水	24.0	91.0	2.791	94.6	67.5	27.1	0.87	11.9	6.01
坪ノ内	31.0	90.2	2.828	121.2	80.9	40.3	-0.02	11.7	7.13
尾尻(上)	29.0	76.4	2.744	119.2	78.1	41.1	-0.26	11.0	6.42
尾尻(下)	25.0	42.5	2.751	90.4	66.4	24.0	-1.00	5.5	7.20
常泉寺	76.0	137.4	2.813	150.4	97.2	53.2	0.76	15.3	6.95
上九沢	82.0	131.0	2.763	181.4	99.3	82.1	0.37	16.6	6.83
相模ヶ丘	27.0	74.8	2.868	91.0	60.8	30.2	0.46	11.9	6.65
馬場	47.0	120.9	2.904	126.8	91.7	35.1	0.83	12.5	6.78

(2) X線回折試験

420 μm ふり通過試料を、メノウ鉢中で十分細かくなるまですったものを使用した。回折定数は  $\lambda = 1.5418 \times 10^{-10} \text{m}$ 、対陰極 Cu K $\alpha$  である。

(3) 土の保水性試験

非自由水分は、水ポテンシャル 1,550 kPa (旧 pF = 4.2) に相当するものとし、圧力板法によって行った (竹中, 1963)。試験は 5 cm  $\phi$   $\times$  2.5 cm (50 cm<sup>3</sup>) の円筒によって乱さない試料を採取して行った。

(4) 比表面積測定

測定は窒素吸着法、その計算は BET 法による (慶伊, 1990)。

(5) 細孔間隙分布測定

乱さない試料を水銀圧入ポロシメータによって測定した。試料は 8 mm 角に整形し、測定前に凍結乾燥処理を行った。凍結温度は -140°C、凍結時間は 8 時間以上である。測定定数は水銀接触角 147 度、水銀表面張力  $4.84 \times 10^{-1} \text{N/m}$  である。

3. 実験結果と考察

1) アロフェン含有量が物理化学的性質に及ぼす影響

(1) アロフェン量の変化に伴う粘土鉱物の変化

代表的な火山灰質粘性土である関東ロームは、その層序の変化とともに含有粘土鉱物の種類と量が増加することを前に述べてきた。一般に古期ロームはアロフェンを全く含まず、新期ロームの立川ロームはアロフェン量を 50% 以上含有し、武蔵野ロームは 40% 以下であることが知られている (宋, 1998)。またアロフェン量 (以下  $A_p$  と表記する) 40~50% は両層の境界に存在するものと考えられている。図-1 は関東ロームの X 線回折図である。 $A_p$  量の変化に伴う粘土鉱物の変化を示している。

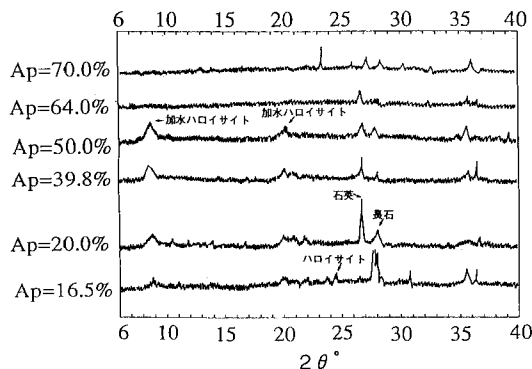


図-1 関東ロームの X 線回折図

Fig. 1 X-ray diffraction diagram of Kanto loam

この図から  $A_p > 50\%$  以上の立川ロームにはアロフェン粘土鉱物のみが含有されていることがわかる。ちなみにアロフェン粘土鉱物の非晶質を示す回折ピークは、30°~40°間の幅広い小ピークで表されると報告されているが (北川, 1977) 一般的にはピークのないのが特徴である。アロフェン量が減少し、 $A_p < 40\%$  の武蔵野層になると順に加水ハロイサイトおよびハロイサイトの出現が見られる。このように深さ方向にアロフェン量が減少し、それとともに加水ハロイサイトが指数曲線的に増加していくことが著者によって確かめられている (宋, 1995, 1998)。

(2) アロフェン量と団粒構造の関係

前に述べたようにアロフェン粘土鉱物は団粒構造形成の主要な原因の一つである。このことはアロフェン量の増加につれて、その表面積と細孔間隙量が増加することによって証明できる。なぜなら理想的な球状粒子において、密に詰まった一次団粒構造が二次構造に成長すれば、その間隙率は 20% 増加し、粗に詰まれば 25% も増加することから推察できるからである (川口ら, 1974; 岡島 1989)。また団粒構造間には粗間隙があり、その内部には微細間隙があるので間隙量の増加につれて、その表面積も増加することになる。以上の理論的推論を実験的に証明したのが図-2 と図-3 である。これらの図は、おのおの乱さない土のアロフェン量と比表面積および累積細孔間隙量の関係である。ここで累積細孔間隙量とは、水銀圧入ポロシメータで計測されたすべての径の間隙量の総計であり、普通土の乾燥単位質量の間隙体積 (cm<sup>3</sup>/g) として表示される。以後これを全間隙量と称することにする。これらの図からアロフェン量と比表面積およ

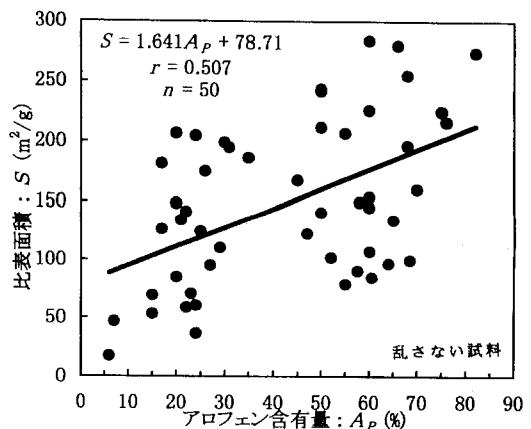


図-2 アロフェン含有量と比表面積の関係

Fig. 2 Relationship between allophane content and specific surface area

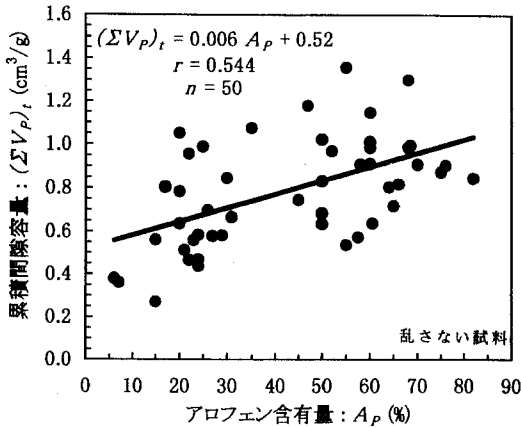


図-3 アロフェン含有量と累積細孔間隙容量の関係  
 Fig. 3 Relationship between allophane content and cumulative pore volume

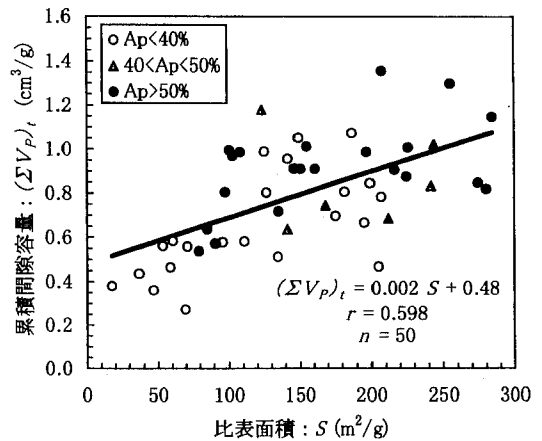


図-4 比表面積と累積細孔間隙容量の関係  
 Fig. 4 Relationship between specific surface area and cumulative pore volume

び全間隙量の間には、次のような直線的正の相関関係があることがわかる。

$$s = 1.641 A_p + 78.71 \quad (1)$$

$$r = 0.507 \quad n = 50$$

$$(\Sigma vp)_t = 0.006 A_p + 0.52 \quad (2)$$

$$r = 0.544 \quad n = 50$$

ここで  $A_p$  = アロフェン含有量 (%)

$s$  = 比表面積 ( $m^2/g$ )

$(\Sigma vp)_t$  = 全間隙量 ( $cm^3/g$ )

$r$  = 相関係数  $n$  = 試料数

以上の関係からアロフェン粘土鉱物が団粒構造形成の主要な一要因であることがわかる。関東ロームの比表面積の値はアロフェン量によって  $50 \sim 250 m^2/g$  の間に分布している。この値は一般に報告されている値とほぼ一致する(高橋ら, 1985)。また全間隙量はほぼ  $0.4 \sim 1.2 cm^3/g$  の間にあり、締固めた関東ロームの  $0.1 \sim 0.35 cm^3/g$  に比べるとかなり大きい(山口ら, 1992)。締固めにより団粒構造が破壊されると、いかに大きく間隙が変化することがわかる。図-4 は比表面積の増加が間隙量の増加をもたらすことを示したものである。両者の間には次式のような直線的正の相関関係がある。

$$(\Sigma Vp)_t = 0.002 s + 0.48 \quad (3)$$

$$r = 0.598 \quad n = 50$$

ミクロ的に測定された全間隙量が妥当なものであるかは地盤工学的な量である間隙比と対比することによって知ることができる。図-5 はこのような関係を示したものであり、全間隙量と間隙比の間には次のような直線的正の相関関係がある。

$$(\Sigma Vp)_t = 0.191 e_0 + 0.16 \quad (4)$$

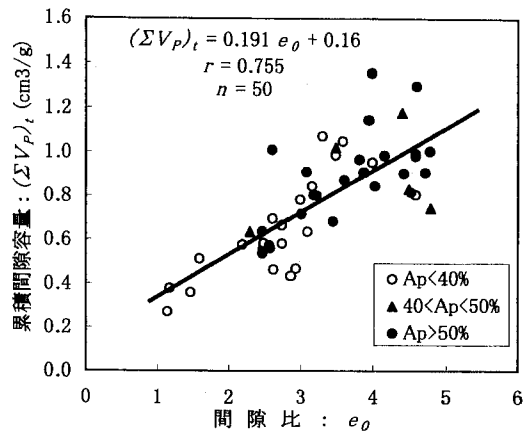


図-5 間隙比と累積細孔間隙容量の関係  
 Fig. 5 Relationship between void ratio and cumulative pore volume

$$r = 0.755 \quad n = 50$$

ここで  $e_0$  = 間隙比

(3) アロフェン量と非自由水分量の関係

土中水はその重力によって運動する自由水に対し、アロフェン質土粒子に強く吸着されている多量の非自由水を有している。この非自由水はアロフェンの中空間隙の内部や団粒構造内部の微細間隙中に保持されている。その最小水分ポテンシャルは約  $1,550 kPa$  (旧  $pF = 4.2$ ) であることが知られている(竹中, 1963)。非自由水は乾燥によって減少し、また締固めなどの機械力によって自由水に変化するが、その水分特性曲線は脱水過程と吸水過程で異なる。図-6 はアロフェンが非自由水分を保持して

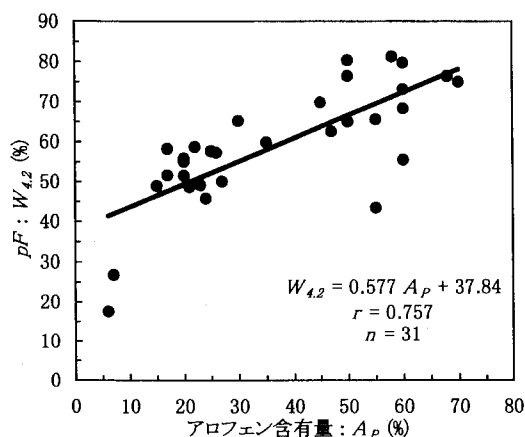


図-6 アロフェン含有量と非自由水の関係

Fig. 6 Relationship between allophane content and non-free water content

いることを示す図である。アロフェン量の増加とともに非自由水分量も直線比例的に増加していることがわかる。両者間には次のような直線的正の相関関係がある。

$$w_{4.2} = 0.577 A_p + 37.84 \quad (5)$$

$$r = 0.757 \quad n = 31$$

ここで  $w_{4.2}$  = 非自由水分量 (%)

この図から関東ロームの非自由水分は、ほぼ 40~80% の間に分布し、幾つかの報告とも一致していることがわかる (Maeda *et al.*, 1977; 竹中, 1963; Warkentin *et al.*, 1974)。

(4) アロフェン量と pH および分散との関係

一般に結晶性粘土が強酸性の性格であるのに対し火山灰土は弱酸性の性格を有している (川口, 1974; Warkentin *et al.*, 1974)。この弱酸性はアロフェンの有する多量の活性アルミニウムに起因しているので、図-7 に示すようなアロフェン量と pH の相関性が考えられる。アロフェン量が増えるにしたがって、その pH 値は直線的に減少している。またアロフェン量の高いところでは、その値はほぼ 5.5~7.5 の弱酸性の範囲内にあることがわかる。両者の関係は次式のように表される。

$$pH = -0.017 A_p + 7.42 \quad (6)$$

$$r = 0.518 \quad n = 58$$

アロフェン質火山灰土の pH が重要な理由は、そのイオン交換容量、アルミニウム溶出量や団粒構造の分散性が pH 値によって変化するからである (川口, 1974; 岡田, 1989; 多田ら, 1963)。すなわちそのイオン交換容量は pH 依存荷電 (変異荷電) であるのみならず、pH が強酸性に向かうにしたがって (pH=2~4) アルミニウムの溶出量が増加する。一方アロフェン質火山灰土の団粒構造

の分散には、塩酸などによる酸性分散が有効であることが早くから知られてきた (地盤工学会, 1990; 多田ら, 1963; 多田, 1965)。しかしこれらの研究では、その工学的意義および従来のアルカリ分散と酸性分散の限界が明らかでないのが欠点である。図-8 は、このような欠点を補うために行ったアロフェン量と均等係数の関係である。従来のヘキサメタリン酸ナトリウムによる分散と塩酸による分散効果は、工学的意義を有する均等係数の大小によって比較されている。この図からアロフェン量 50% 以上の土のみ塩酸による分散効果が大きく、それ以下では従来の分散法がなお有効であることがわかる。分散効果を粒径  $2\mu\text{m}$  以下の粘土分で表したのが図-9 であ

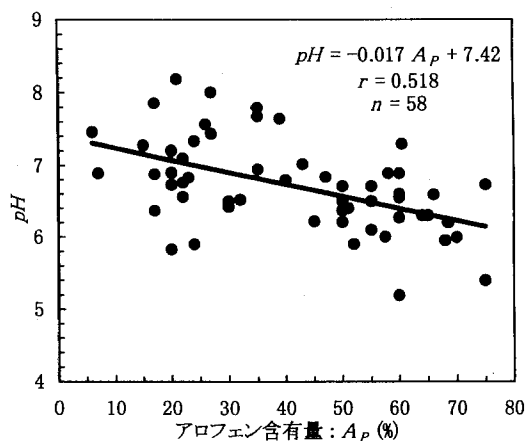


図-7 アロフェン含有量と pH の関係

Fig. 7 Relationship between allophane content and pH

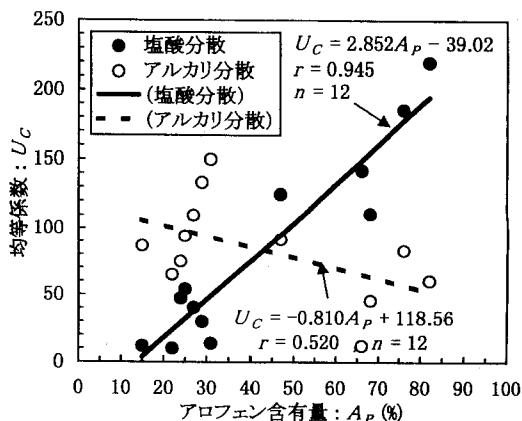


図-8 アロフェン含有量と均等係数の関係

Fig. 8 Relationship between allophane content and uniformity coefficient

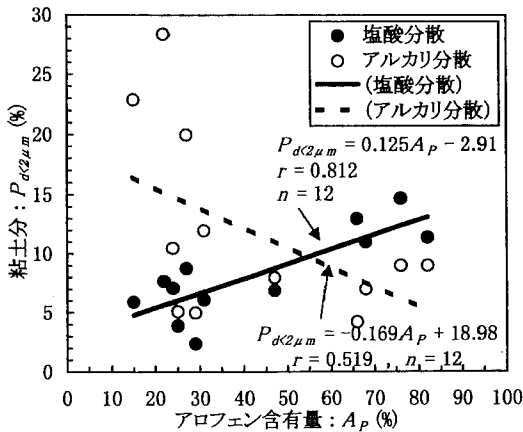


図-9 アロフェン含有量と粘土分の関係

Fig. 9 Relationship between allophane content and clay fraction

る。図-8と同様な結論が得られる。また図-8から酸性分散の場合、アロフェン量と均等係数の間には次のような直線的正の相関関係があることがわかる。

$$U_c = 2.852 A_p - 39.62 \quad (7)$$

$$r = 0.945 \quad n = 12$$

ここで  $U_c$  = 均等係数

図-10はアロフェン量の異なるいろいろな試料の懸濁液に1 mol/l HClを添加してpH値を変化させた場合の均等係数との関係を示したものである。これからアロフェン量のいかに係らず、均等係数が最大になる各懸濁液の最適pH値はおおよそ3~4の間にあることがわかる。均等係数が最大であることは、懸濁液の分散が最大に行われていることを示すものである。pH=3~4になる1 mol/l HClの添加量は、任意のアロフェン量に対して約20 cc前後であることが確かめられている(宋, 1993)。酸性分散がアロフェン質火山灰土に対して有効な理由は次のようである。アロフェンはpH依存荷電を有し、その等電点はpH=6付近である。ゆえに塩酸を添加して懸濁液が酸性になるとアロフェンの正荷電が増加する。よって土粒子相互の斥力が増大し分散される結果となる。また団粒の結合物質でもある活性アルミニウムや酸化鉄の等電点もpH=8付近であるため、酸性状態になると同様の理由で斥力が増え分散される(岩田, 1989; 岡島, 1989)。

## 2) アロフェン含有量と指示的性質の関係

一般に粘土の指示的性質の一つであるコンシステンシー限界などを支配する要因は、その比表面積であることが知られている(葛上ら, 1971; Muhanthan, 1971; 高橋ら, 1985)。図-2で示されるように、比表面積はアロ

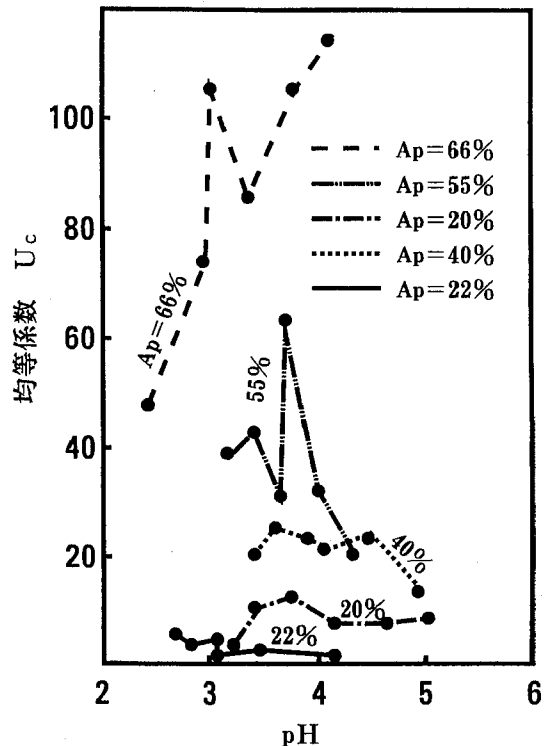


図-10 pHと均等係数の関係

Fig. 10 Relationship between pH and uniformity coefficient

フェン量の増加とともに増加する。表面積の増加は水分吸着の場の増加を意味する。ゆえにアロフェン量の増加とともに、そのコンシステンシー限界も増加することになる。アロフェン質粘土については、練返しによる非自由水の自由水化も大きく作用していることが考えられる。すなわちアロフェン量の増加につれて、その比表面積と自由水が増加することにより、そのコンシステンシー限界が増加することが結論づけられる。このような関係を示したのが図-11~図-13である。これらの図は、おのおのアロフェン量と自然含水比、液性限界および塑性限界の関係を示したものである。これらの両者間にはおのおの次のような直線的正の相関関係が存在する。

$$w_n = 0.923 A_p + 59.46 \quad (8)$$

$$r = 0.570 \quad n = 131$$

$$w_L = 1.037 A_p + 64.80 \quad (9)$$

$$r = 0.657 \quad n = 132$$

$$w_p = 0.755 A_p + 44.62 \quad (10)$$

$$r = 0.663 \quad n = 131$$

ここで  $w_n$  = 自然含水比 (%)

$w_L$  = 液性限界 (%)      $w_p$  = 塑性限界 (%)

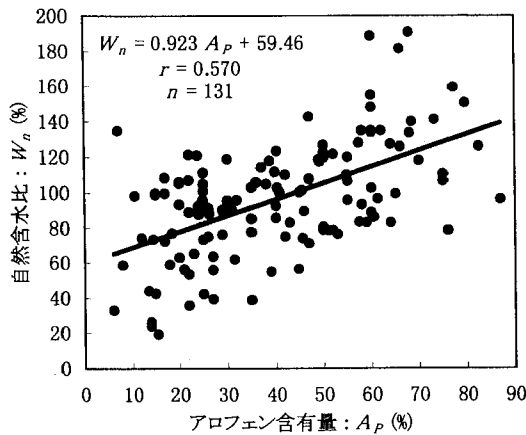


図-11 アロフェン含有量と自然含水比の関係

Fig. 11 Relationship between allophane content and natural water content

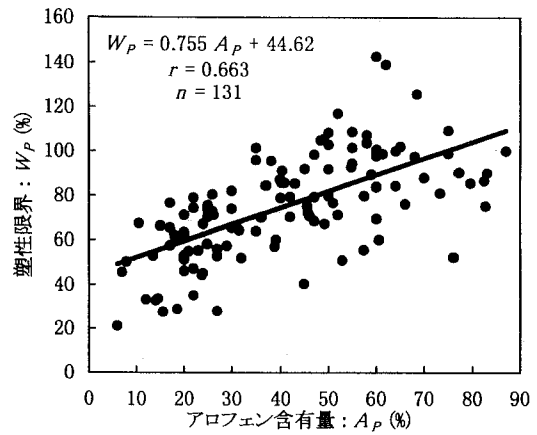


図-13 アロフェン含有量と塑性限界の関係

Fig. 13 Relationship between allophane content and plastic limit

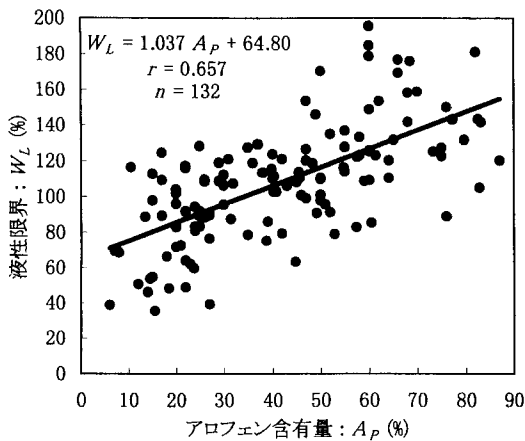


図-12 アロフェン含有量と液性限界の関係

Fig. 12 Relationship between allophane content and liquid limit

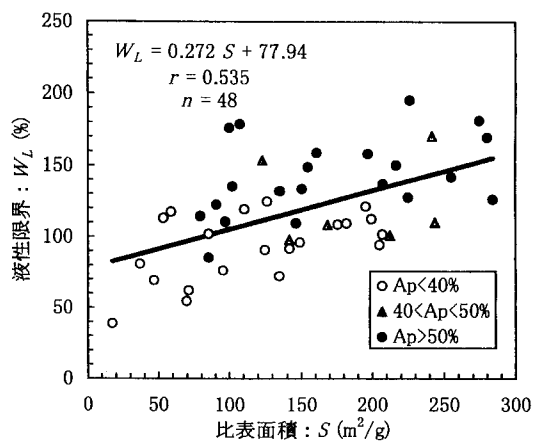


図-14 比表面積と液性限界の関係

Fig. 14 Relationship between specific surface area and liquid limit

アロフェン量の定量にはかなり煩雑なプロセスと莫大な時間を要する。そのためアロフェン量と液性限界の直線的比例関係を利用して、液性限界をアロフェン量の等価指数として利用できるメリットを有している。また表面積の増加が吸水の場の増加を示す一例として比表面積と液性限界の関係を示したのが図-14である。両者の間には次のような直線的正の相関関係がある。

$$w_L = 0.272 S + 77.94 \quad (11)$$

$$r = 0.535 \quad n = 48$$

この他にも比表面積と自然含水比および塑性限界の間の直線的比例関係を報告した研究もある（今野，1993；高橋ら，1985）。図-15はアロフェン含有量と塑性指数の関

係である。両者の間には明瞭な関係が見られない。過去の研究においても、液性限界と塑性限界との関係について言及したものはあるが、塑性指数との関係について述べたものは皆無である（Warkentin *et al.*, 1974；Wesley, 1973）のは、このような明瞭な関係が存在しないことによるものと思われる。この図でアロフェン量が40～50%で塑性指数が最低になる特異点が見られる（宋，1994）。塑性指数はほぼ10～60%の間に分布している。一般に粘土の塑性指数は、その粘土鉱物の量に比例するのが普通であるが、関東ロームには、この関係が当てはまらない。この理由は、関東ロームの液性限界と塑性限界が試験開始時の含水比と練返し程度により変動す

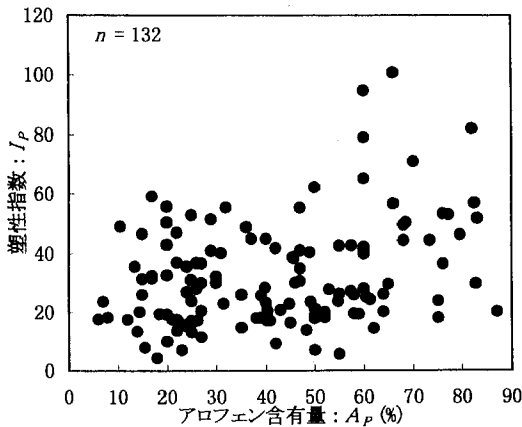


図-15 アロフェン含有量と塑性指数の関係

Fig. 15 Relationship between allophane content and plasticity index

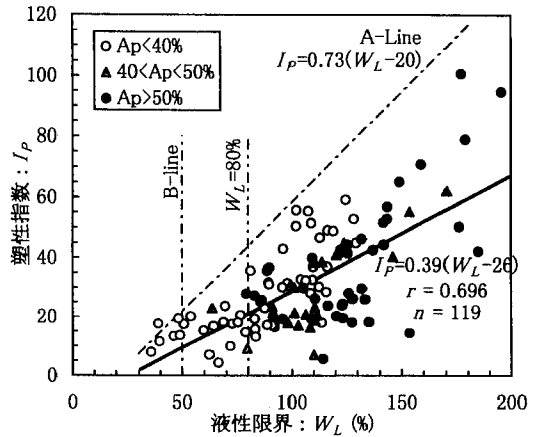


図-16 火山灰質粘性土の塑性図

Fig. 16 Plasticity chart of volcanic cohesive soil

ることによるものと思われる (地盤工学会, 1974)。図-16は普通に塑性図と呼ばれる液性限界と塑性指数の関係である。一般に火山灰質粘性土は板状粘土の分布線を表すA線の下部に分布することが知られている (前田ら, 1983; 高速道路調査会, 1973) が, 本研究においても同様な結果となっている。しかしこの図でもっと明らかなことは, アロフェン量が多いほどA線から偏離し, かつすべての関東ロームがA線の傾きより小さい次のような直線上に分布していることである。

$$I_p = 0.39(w_L - 26) \quad (12)$$

$$r = 0.696 \quad n = 119$$

地盤工学会では,  $w_L = 80\%$  を  $VH_1$  と  $VH_2$  の分類基準としている。この図から  $w_L$  が  $80\%$  以下のものもかなりの数にのぼるが, そのほとんどがアロフェン量  $40\%$  以下のものである。農業土壌の分野ではこの  $80\%$  を火山灰土の下限としているが, それはアロフェン量の大きいA, B層のみを研究対象としている限り正しいものと思われる。この塑性図上におけるインドネシアの火山灰土の位置は本邦の更に下方にあるとの報告もあるが, その理由もこれと同様である (前田ら, 1983)。

図-17はアロフェン量と強熱減量の関係である。両者間には次のような直線的正の相関関係がある。

$$L_{ig} = 0.128 A_p + 8.12 \quad (13)$$

$$r = 0.626 \quad n = 99$$

ここで  $L_{ig}$  = 強熱減量 (%)

一般にアロフェン量は地表に近づくほど増加し, 有機物が多くなることが知られている。関東ロームの表層を占める黒ボク土がこのことを示している。ゆえに上式に示すような比例関係がある。強熱減量は約  $20\%$  以内にあ

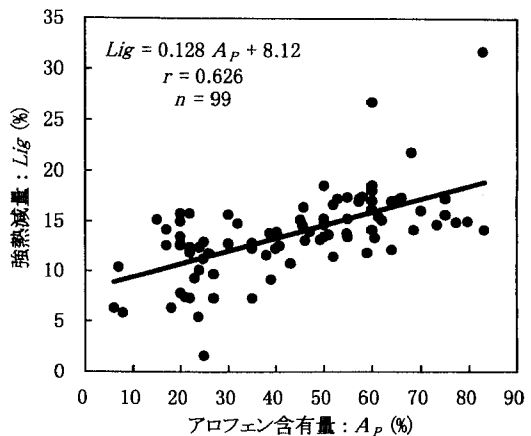


図-17 アロフェン含有量と強熱減量の関係

Fig. 17 Relationship between allophane content and ignition loss

るが, 従来から報告されている値と一致する (地盤工学会, 1991)。これらのデータから指示的性質相互の間にも密接な関係が存在することが知られている (So, 1998)。

### 3) 乱さない土のアロフェン含有量と物理的性質の関係

アロフェン粘土鉱物が団粒構造を形成し, かつアロフェン量が増えるにつれて総間隙量が増加することは図-3で示した。ここで総間隙量の増加を地盤工学的な量からみると, それは間隙比の増加および乾燥密度の減少ということになる。ゆえにアロフェン量の増加につれて間隙比は増加し, 乾燥密度は減少する。図-18と図-19はこの関係を示したものである。おのおの次のような



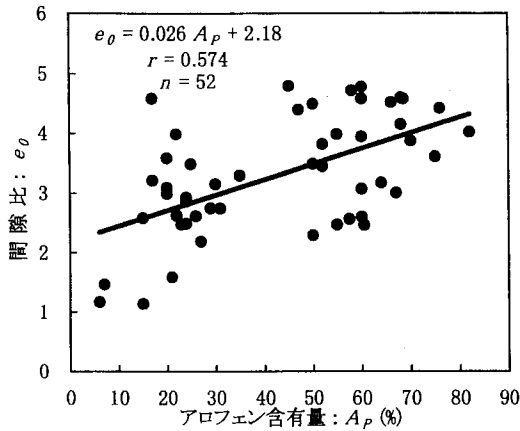


図-18 アロフェン含有量と間隙比の関係

Fig. 18 Relationship between allophane content and void ratio

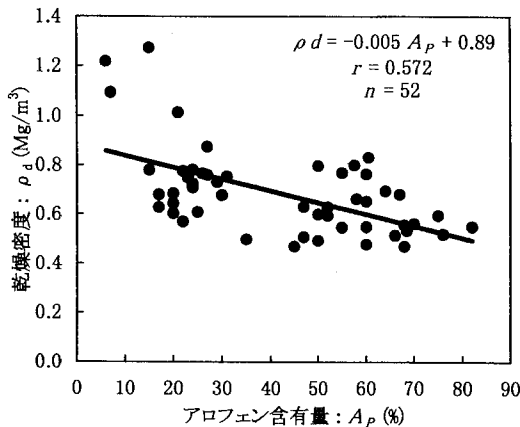


図-19 アロフェン含有量と乾燥密度の関係

Fig. 19 Relationship between allophane content and dry density

直線関係を有している。

$$e_0 = 0.026 A_p + 2.18 \quad (14)$$

$$r = 0.574 \quad n = 52$$

$$\rho_d = -0.005 A_p + 0.89 \quad (15)$$

$$r = 0.572 \quad n = 52$$

ここで  $e_0$  = 間隙比  $\rho_d$  = 乾燥密度 (Mg/m<sup>3</sup>)

また間隙比と乾燥密度の間には図-20 に示すような関係がある。すなわち間隙比が増えるとその乾燥密度は指数曲線的に減少していく。この関係は次のような式で表される。

$$e_0 = 11.087 e^{-1.8468 \rho_d} \quad (16)$$

図-20 は地盤工学的に常識的なものであるが、次のよう

な重要性を有している。すなわち関東ロームの乱さない試料は、クラックが多いため採取が困難で誤差が大きいものになりがちである。ゆえに図-20 は図-18 と 19 のデータの正しさを立証するためのものである。また関東ロームの間隙比と乾燥密度の関係を示すデータは同様の理由でほとんどない現状にある。

火山灰土は、一般に軽い土と言われている。アロフェン量が増えると、間隙比と有機質が増加するので単位体積重量は減少することが考えられる。ゆえに図-21 からアロフェン量が増えると単位体積重量が減少し、両者間には次のような直線的負の相関関係があることがわかる。

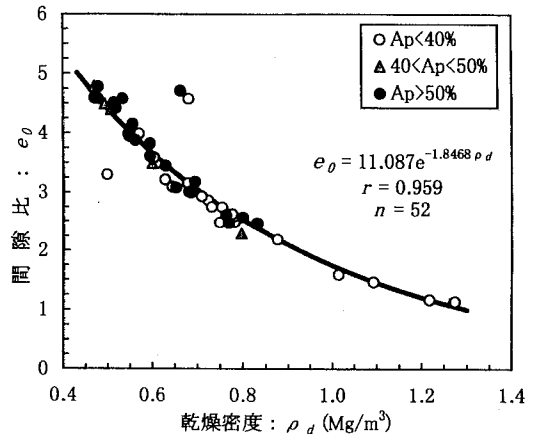


図-20 乾燥密度と間隙比の関係

Fig. 20 Relationship between dry density and void ratio

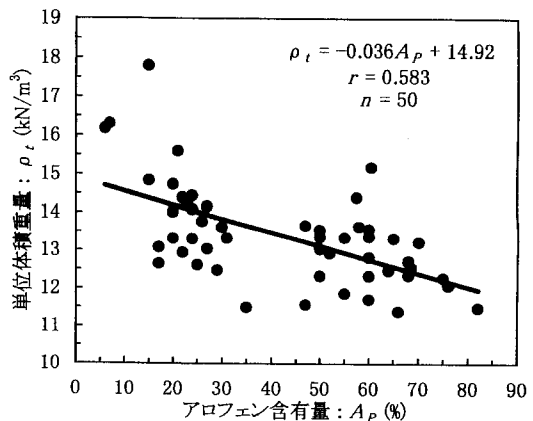


図-21 アロフェン含有量と単位体積重量の関係

Fig. 21 Relationship between allophane content and unit weight

$$\rho_t = -0.036 A_p + 14.92 \quad (17)$$

$$r = 0.583 \quad n = 50$$

ここで  $\rho_t$  = 単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)  
 この図から火山灰質粘性土の単位体積重量は、ほぼ 16 kN/m<sup>3</sup> (1.6 tf/m<sup>3</sup>) 以下であり、一般土の標準値である 16.5 kN/m<sup>3</sup> よりもずっと軽いことがわかる。

4) アロフェン含有量が締固め曲線に及ぼす影響

一般に火山灰質粘性土は、締固め曲線やその施工管理における特異性を有している (高速道路調査会, 1973)。すなわち試験開始時の含水比や締固め試料の処理方法の違いにより締固め曲線が変動する。また高含水比のため、最適含水比による締固めが困難であるので、飽和度や空気間隙率による施工管理法がとられている。締固め過ぎによる強度低下をもたらすオーバーコンパクション現象もよく知られている。アロフェン量とこれらの締固め挙動との定量的関係の一端は、著者によって報告されてきた (宋, 1993, 1994)。これらの研究において、特にアロフェン量と締固め曲線の変化および最大乾燥密度の関係を示したのが図-22 と図-23 である。図-22 の締固め曲線からアロフェン量が高いほど締固め曲線は平坦になり、最大乾燥密度も小さくなることがわかる。またこの図から図-23 に示すようなアロフェン量と最大乾燥密度の負の相関関係が得られる。この両者の間には次のような直線的負の相関関係がある。

$$\rho_{d_{max}} = -0.005 A_p + 0.97 \quad (18)$$

$$r = 0.715 \quad n = 43$$

ここで  $\rho_{d_{max}}$  = 最大乾燥密度 (Mg/m<sup>3</sup>)  
 上式の実験では、軽石を含んだ試料があったので本解析から外した。ただし軽石は武蔵野ローム層下部、すなわ

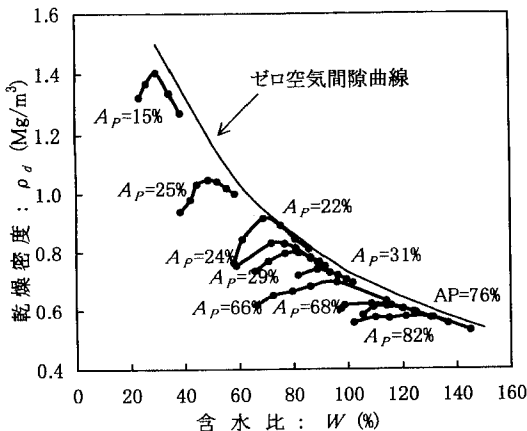


図-22 火山灰質粘性土の締固め曲線  
 Fig. 22 Compaction curve of volcanic cohesive soil

ちアロフェン量約 30% 以下の場合にのみ存在する。過去の研究から、軽石を含むと乾燥密度、強度や透水性などが急に増加することがある (So *et al*, 1998) ためである。また図-22 の締固め曲線から、図-24 と図-25 の関係が得られる。図-24 はアロフェン量と最適含水比の関係、図-25 は最大乾燥密度と最適含水比の関係である。おのおの、次のような直線的正あるいは負の相関関係がある。

$$w_{opt} = 0.735 A_p + 57.64 \quad (19)$$

$$r = 0.707 \quad n = 43$$

$$\rho_{d_{max}} = -0.006 w_{opt} + 1.31 \quad (20)$$

$$r = 0.969 \quad n = 43$$

ここで  $w_{opt}$  = 最適含水比 (%)

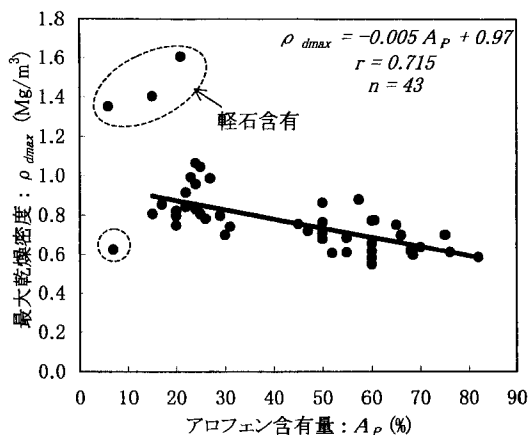


図-23 アロフェン含有量と最大乾燥密度の関係  
 Fig. 23 Relationship between allophane content and maximum dry density

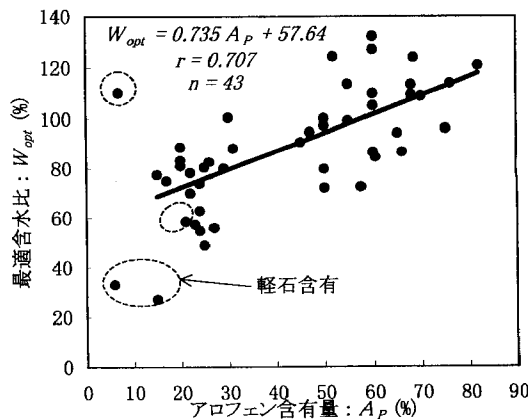


図-24 アロフェン含有量と最適含水比の関係  
 Fig. 24 Relationship between allophane content and optimum water content

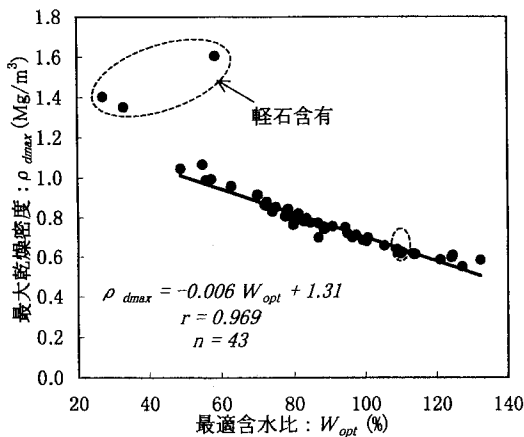


図-25 最適含水比と最大乾燥密度の関係

Fig. 25 Relationship between optimum water content and maximum dry density

#### 4. 結 論

以上の研究結果から、次の結論を得る。

(1) アロフェン量の増加につれて団粒構造の形成が促進されることは、その比表面積と全空隙量の増加によって証明できる。

(2) アロフェン量と自然含水比、液性限界、塑性限界、非自由水分量および強熱減量の間には、おのおの直線的正の相関関係がある。

(3) 火山灰粘性土の物理的指数のうちでも、最も安定した液性限界はアロフェン量との直線的関係を有しているので、この液性限界をアロフェン量の等価指数とすることができる。

(4) アロフェン量 50% 以上の試料は塩酸による分散が有効である。

(5) 塑性図上における火山灰質粘性土の位置は、A 線の傾きより小さい直線上に分布する。またアロフェン量が高いほど A 線から離れる傾向にある。

(6) 乱さない土のアロフェン量と空隙比との間には直線的正の相関関係、また乾燥密度および単位体積重量との間には、おのおの直線的負の相関関係がある。

(7) 締め固めた火山灰質粘性土のアロフェン量と最大乾燥密度との間には負の直線的相関関係がある。

#### 参 考 文 献

1) 今野 誠 (1993) : 火山灰質粘性土の粘土化による塑性図上の位置について、土の判別と工学的分類に関するシンポジウム発表論文集、地盤工学会、pp 143-150.

- 2) 岩田進午 (1989) : 土を科学する, NHK 市民大学 pp 7-108.
- 3) 地盤工学会 (1974) : 日本の特殊土 (第 2 章火山灰質粘性土) pp 21-83.
- 4) 地盤工学会 (1991) : 土の試験実習書, pp 15, 102.
- 5) 川口桂三郎 (1974) : 土壌の物理性, 土壌学, 朝倉書店, pp 130-140.
- 6) 慶伊富長 (1990) : 吸着 (第 6 章 表面積と細孔分布), 共立出版, pp 95-131.
- 7) 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, 29, pp 1-48.
- 8) 葛上 久, 尾崎勲司, 中谷三男 (1971) : 比表面積と液性限界の関係, 農土論集, 37, pp 61-97.
- 9) Maeda, T, Takenaka, H and Warkentin, B.P. (1977) : Physical properties of allophane soils, Advance in Agronomy, Academic Press, Vol. 29, pp 229-260.
- 10) 前田 隆, 相馬剋之 (1983) : 火山灰土の物理性と工学的性, 火山灰土, 博友社, pp 99-139.
- 11) Muhanthan, B. (1971) : Liquid Limit and surface area of clays, Geotechnique, Vol. 41 No. 1, pp 135-138.
- 12) 岡島秀夫 (1989) : 土の構造と機能, 農文協, pp 35-82.
- 13) 関東ローム研究グループ (1965) : 関東ローム, 築地書館.
- 14) 高速道路調査会 (1973) : 関東ロームの土工, 共立出版.
- 15) 宋 永焜 (1993) : 関東ロームのアロフェン含有量とその工学的分類に及ぼす影響, 土の判別と工学的分類に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp 151-158.
- 16) 宋 永焜, 応 長雲 (1994) : 関東ロームのアロフェン含有量が石灰-石膏安定処理土に及ぼす影響, 土質工学会論文報告集, Vol. 34, No. 4, pp 97-107.
- 17) 宋 永焜 (1994) : 関東ロームのアロフェン含有量とその特異挙動に及ぼす影響, 土質工学会論文報告集, Vol. 34, No. 2, pp 141-151.
- 18) 宋 永焜 (1995) : 関東ロームのアロフェン含有量が土質工学的性質に及ぼすミクロの影響, 火山灰質土の性質と設計施工に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp 161-168.
- 19) 宋 永焜 (1998) : 関東ロームにおける地質学の地盤工学への応用, 土と基礎, Vol. 46, 2, pp 33-35.
- 20) So, E.K., Inoue, K. and Okada, F. (1998) Influence

- of allophane content on the mechanical properties of volcanic cohesive soils, Intern. Symp. on Problematic Soils, Sendai, Japan, Vol. 1 pp 131-135.
- 21) So, E.K. (1998) : Statistical correlation between allophane content and index properties for volcanic cohesive soil, Soils and Foundations, Vol. 38, No. 4, pp 85-93.
- 22) 高橋 悟, 白井清恒 (1985) : 土壌の比表面積による水分特性曲線の推定について (第一報) - 腐植を含まない場合 - 農土論集, 117, pp 25-33.
- 23) 竹中 肇 (1963) : 関東ロームの非自由水分, 農土研別冊, 7, pp 68-75.
- 24) 多田 敦, 山崎不二夫 (1963) : 関東ロームの粒度分析, 農土研別冊, 5, pp 17-23.
- 25) 多田 敦 (1965) : 火山灰土の粒度分析の問題点, 第 10 回シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp 23-26.
- 26) Warkentin, B.P. and Maeda, T. (1974) : Physical properties of allophane soils from the West Indies and Japan, Pro. Soil Sci. Soc. Amer. Vol. 38, pp 372-377.
- 27) Wesley, L.D. (1973) : Some basic engineering properties of halloysite and allophane clay in Java Indonesia, Geotechnique, Vol. 23, pp 471-494.
- 28) 山口晴幸, 池永 均 (1992) : 締固め土の間隙構造, 土木学会論文集, 448, 3-19, pp 35-44.

受稿年月日: 1998 年 8 月 27 日

受理年月日: 1999 年 4 月 19 日