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[†]

宋 永 焜*

Influence of Allophane Content on Engineering Properties of Volcanic Soils

by

Ei-Kon So*

Volcanic soils show many abnormal characteristics in engineering properties. High natural water content, change in consistency limit with initial water content, different behaviors for the disturbed and undisturbed states, and irreversibility in compaction curve are some of them.

Young volcanic soils contain many amorphous clay minerals. The abnormal behaviors are supposed to originate from the allophane behavior. Therefore, all the engineering properties were investigated as function of allophane content in this study. The main results obtained are summarized as follows.

- (1) The natural water content, liquid limit and permeability increased linearly with increasing allophane content, while the residual strength decreased.
- (2) The degree of deviation in compaction curve for the sample by drying process from that by wetting process depended on the allophane content.
- (3) The dispersive effect by acid became more effective than that by alkali when the allophane content increased.
- (4) The pF curve shifted to the side of higher water content with increasing allophane content.

Key words : Volcanic soils, Allophane content, Dispersive effect, Consistency, pF curve, Compaction, Permeability, Shear strength

1 序 論

関東ロームは東京・横浜を中心として関東地方一帯に分布する火山灰粘性土である。世界的に見ても、主として、ハワイ、ニュージーランドにしか存在しない特殊土である。地質学的に見た関東ロームは、立川ローム、武蔵野ローム、下末石ローム、多摩ロームと呼ばれる層序を有し、この順に若い層から古い層となっている。これらの層は洪積世の富士箱根、浅間および赤城などの火山活動に由来する火山灰風化土からなっている。鉱物学的には、一次鉱物として、主に橄欖石、輝石を含み、二次鉱物は、非晶質のアロフェンおよびハロイサイトを含有している。立川ロームのような新しい層ほどアロフェン量に富み、古い層になるにつれて、ハロイサイトが多くなることが知られている。また土壌学的には、一般に黒ボクと呼ばれ工学的には、通称赤土と呼ばれている。

土質工学的に見た関東ロームは、多くの特異な性質を有し、赤土・シラスなどと共に本邦の特殊土を形成している。関東ロームの自然含水比は高く、こね返しや土工作業などによる乱れの影響が、そのコンシステンシーや締固め特性、強度特性に大きく作用すること

が知られている。これらの特性は、本質的には、関東ロームに含有されている多量の拘束水分の影響によるものとされている。一方、関東ロームの安定処理から見ると、石灰との反応性が良く²⁾、他の安定材に比べて多く利用されている。このように関東ロームの特殊性を形成している拘束水分および石灰との良好な反応性は、すべてアロフェン粘土鉱物に帰因することが考えられる。アロフェンは直径約 50 Å の中空、球状粘土鉱物であり、X 線回折では、おおよそ 2.3 Å (25.4°)、3.5 Å (39.2°) 付近に幅広い非晶質型の回折像を示すことが知られている¹³⁾。

本研究は、関東ローム中に存在するアロフェン量を定量し、その拘束水分に及ぼす影響を pF 測定により追求すると共に、工学的にはアロフェン量がコンシステンシー限界、分散性、締固め特性、透水性およびせん断定数に及ぼす影響を求めようとするのが目的である。

2 過去の研究

関東ロームに関する系統的な研究は、第 2 次大戦後、まず地質学的な立場からなされ、集大成されている¹⁾。工学的立場からは、東名高速道路建設の研究と経験を

† 原稿受理 平成 3 年 2 月 27 日 Received Feb. 27, 1991

* 正 会 員 関東学院大学工学部 横浜市金沢区六浦町, Kanto Gakuin University, Mutsuura-cho, Kanazawa-ku, Yokohama

とり入れ、設計施工の実用的見地から「関東ロームの土工²⁾」と題して出版されている。これに先立って、関東ロームの締固め特性について、久野の特筆すべき研究がある³⁾。一方、関東ロームの物理化学性が工学的特性に及ぼす影響に関する研究では、従来から農業工学関係者から多数の成果が発表されている。また古くは、関東ロームに関するシンポジウムが昭和40年代に開催されている⁵⁾。まだ火山灰粘性土に関する総説的なものには、土木学会、土質工学会および日本土壤肥科学会⁸⁾より、それぞれ成書として出版されている。

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がアロフェン量の影響に関する定量的な研究を行ったものは、数少ない。このうち Wesley⁹⁾らはニュージーランドの火山灰粘性土について、田中¹⁰⁾は関東ロームについてわずかに言及しているのみである。最も新しいものでは、著者らによる、一連の研究がある^{11), 12)}。

3 実験試料および実験方法

3.1 実験試料

関東ローム試料は、主として、東京、横浜市周辺に分布するものを用いた。実験は、すべて2mm以下の試料について行った。

3.2 実験方法

土質工学会試験法に準拠する一般試験のほかに、次の試験を行った。

(1) アロフェン定量試験：現在まで、まだ一定の定量法はないが、本研究では、北川の8NHCl- $\frac{1}{2}$ NaOH交互溶解法¹³⁾によって行った。この定量法

Fig. 1. Quantitative method for Allophane content.

Fig. 2. Determination of Allophane content.

のフローチャートと定量法を Fig. 1, Fig. 2 に示す。

この原理は次の通りである。すなわち、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性鉱物のほうがはるかに早い。したがって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、土が非晶質鉱物を含有しているときには、成分の溶出含量は当初急激に増加し、それ以後は直線的に増加する。それで溶解パターンを示す曲線の直線部分を延長して y 軸と交差する点を求めることによってアロフェン非晶質鉱物の成分を知ることができる。

(2) pF 試験：自動圧力測定装置を含む広域 pF 測定器 (pF=1.5~4.2) を用いて行った。圧力の負荷は pF=3.0 までは空気圧、それ以上では N₂ ガスによった。なお pF 試験試料は、5 cmφ×2 cm の円筒内に2層×25回×40 # の締固めエネルギーで締固めたもの、または、不攪乱試料を採取して行った。

(3) 締固め試験：ハーバード小型締固め試験器で行った。締固め曲線作成には、3層×25回×40 # の締固めエネルギーで行った。

(4) 透水試験：不攪乱土、または、5 cmφ×5 の円筒内試験を2層×25回×40 # の締固めエネルギーで締固めた後、変水位透水試験を行った。

(5) セン断試験：多連式直接せん断試験機によるピークせん断抵抗角と残留抵抗角を求めた。残留抵抗角を求める残留強度の試験で用いたせん断速度は、0.02 mm/min である。せん断試料は圧密荷重 8 kgf/cm² でいったん圧密し、過圧密試料にして、上記の低速くり返しせん断試験を行った。

4 実験結果および考察

以下順次、アロフェン量とコンシステンシー限界、分散効果、pF 曲線特性、締固め特性、透水性およびせん断特性との関係について述べる。

4.1 アロフェン量と自然含水比、コンシステンシー限界の関係

Fig. 3. Relationship between Allophane content and natural water content.

アロフェンは関東ロームの粘土鉱物であるので、アロフェン量の増加に応じて、その表面積、間げきは増加し、水分吸収の能力も増加する。したがって、含水比で表わされる自然含水比、液性限界、塑性限界、あるいは塑性指数とは、何らかの比例関係が存在することが予想される。Fig. 3, 4, 5, 6 はこれらの実験結果を示したものである。おのおの、ほぼ、アロフェン量と直線関係があり、次のような式で表わされることが分かる。

$$W = 0.76A_p + 68.19 \quad (1)$$

$$r = 0.567$$

$$W_p = 1.074A_p + 34.24 \quad (2)$$

$$r = 0.810$$

$$W_L = 1.17A_p + 63.68 \quad (3)$$

$$r = 0.793$$

$$A_p = 7.57 \frac{I_p}{C_F} + 29.39 \quad (4)$$

$$r = 0.678$$

上式で A_p = アロフェン含有量 (%)

W = 自然含水比 (%)

W_p = 塑性限界 (%)

W_L = 液性限界 (%)

$\frac{I_p}{C_F}$ = 塑性指数/2 μ 以下の粘土分

r = 相関係数

上式は、すべて相関係数約 0.6 以上を有し、特に液性限界、塑性限界との相関性が高いことが分かる。

4・2 アロフェン量が分散効果に及ぼす影響

関東ロームの粘度分析では、一般に、従来から良く使用されている珪酸ナトリウム、苛性ソーダ、およびヘキサメタリン酸ソーダなどのアルカリ性分散材では十分に分散されないことが知られている。この結果は、

Fig. 4. Relationship between Allophane content and Plastic limit.

Fig. 5. Relationship between Allophane content and Liquid limit.

Fig. 6. Relationship between Allophane content and Plastic index/clay fraction.

Fig. 7. Influence of Allophane content on dispersive effect.

Fig. 8. Influence of Allophane content on mean mass diameter.

すべてアロフェン粘土鉱物が影響しているものと思われ、アロフェンを多く含む土では酸性分散が良いことが知られている。しかしこのアロフェン量の分散効果に及ぼす影響を定量的に求めたものは、まだ存在しない。本研究は、yoder 法による団粒分析試験結果から、アロフェン大小による分散効果を平均質量直径の大小で表わすことを試みた。ここで平均質量直径とは、Fig. 7 に示すように、粒径加積曲線と 100% 加積通過率から引いた水平線との間に囲まれた面積で代表される直径であり、団粒分布の状態を単一の物理量によって表示するものである。アロフェン量大 ($A_p = 79.6\%$)、小 ($A_p = 7.6\%$) の 2 種類の土について、いろいろな分散材と凝集材を加えて処理した試料について、その平均質量直径を比較したのが Fig. 8 である。この図から分かるように、アロフェン量の大きいものほど、塩酸処理による平均質量直径は小さくなり、分散効果が大きいことが分かる。これに反して、従来のヘキサメタリン酸ソーダ処理では、アロフェンの大小にかかわらず、あまり分散効果がないことが分かる。また石灰添加による凝集効果では、同じくアロフェン量の影響を受けないことが分かる。また、通常の粒度分析から、分散効果を均等係数の変化で表わしたのが Fig. 9 である。塩酸分散による均等係数の増加は、アロフェン量の増加と共に著しくなることが分かる。

4・3 アロフェン量と pF-水分曲線の関係

Fig. 9. Influence of Allophane content on uniformity coefficient.

大中小のアロフェン含有量を有する関東ロームの試料を最適含水比で締固めた後、その飽和試料を用いて圧力板による pF 測定を行なった結果を pF 一定値の含水比について整理したものが Fig. 10 である。未処理土および石灰処理土のいかににかかわらず、pF 値一定のもとでは、アロフェン量が増加するにつれて、

Fig. 10. Relationship between Allophane content and water content at pF=3.0 and pF=4.2.

Fig. 11. Relationship between Allophane content and characteristics water content.

含水比も増加することが分かる。ここで $pF=3.0$ における含水比は、一般に締固めの最適含水比、あるいは、塑性限界に相当する点である。また $pF=4.2$ の含水比は、関東ロームの拘束水分の最大量を表わすものとされている。ここでアロフェン量の増加と共に含水比が増加するのは、前に述べた自然含水比、コンシステンシー限界の増加と同じく、粘土表面積と間げきの増加によるものである。 $pF=4.2$ におけるこの関係では石灰処理土の含水比が未処理土より低下しているが石灰により消化吸収された分だけの低下によるものと思われる。Fig. 11 はアロフェン量と水分特性値 ($W_{L.2}$) の関係を示したものである。ここで水分特性値とは

水分特性値 ($W_{L.2}$) =

$$\frac{pF=4.2 \text{ における脱水量 (g)}}{\text{飽和含水量 (g)}} \times 100 (\%) \quad (5)$$

で表わされる値であり、飽和水量に対する自由水分の割合を示すものである。この図からアロフェン量が多

いほど自由水分が減少していることが分かる。また石灰処理土では、石灰増加による団粒構造の増加により、間げきが増加し、未処理土に比べてより多くの自由水分が飽和時に吸水され、脱水にあたってより多くの水分が脱水されるものと思われる。一方、石灰処理土においてアロフェン量の増加は、団粒構造の減少をきたす。このため、石灰処理土では、アロフェン量が増加するにつれて、水分特性値が減少することが分かる。

4・4 アロフェン量と締固め特性

Fig. 12 はアロフェン量の違いによる締固め曲線の違いを示している。締固めは加水法によるものである。一般にアロフェン量が大きくなるにしたがって、乾燥密度は低下し、急な山型曲線から平坦なものになることが分かる。この傾向は、砂質土から粘土質土に漸次変化する時の締固め曲線の変化傾向と一致している¹⁶⁾。これは、アロフェンの増加は、粘土分の増加であることによるものである。Fig. 13 はアロフェン量大・中・小の試料について、おのおの加水法および乾燥法に

Fig. 12. Influence of Allophane content on compaction curve.

Fig. 13. Influence of Allophane content on reversibility of compaction curve.

よる締固めを行った結果の比較である。ここで加水法とは、乾燥法に対して言う語であり、通常の締固め法である。すなわち、加水法とは、自然試料を最適含水比以下にまで風乾させた後、注水しながら締固める方法である。これに対して、乾燥法とは、自然状態の高含水比試料を順次乾燥させながら、注水せずに締固めていく方法である。関東ロームの締固め曲線は、一般に締固め含水比の添加の方法の違いによって、その曲線を異にすることが知られている³⁾。すなわち、加水法では、一般に山形曲線を形成するが、乾燥法では、ゼロ空気間けき曲線付近から離れる時点より平坦な左あがり曲線となり、両曲線は、一般に一致しない。すなわち両曲線は非可逆性を有している。Fig. 13 はアロフェンの影響による、この違いを示そうとしたものである。明確な傾向は見られないが、アロフェン量が大きくなるにつれて、両曲線は、ますます大きく乖離する傾向が見られる。すなわち、アロフェン量が最小の曲線 ($A_F=26.2\%$) では、相似の山形曲線を有しているのに対し、大きいもの ($A_F=82.5$) は、締固め曲線の相似性もなく、大きく乖離していることが分かる。これらの事実から、アロフェン量がゼロかまたは、それに近い土では、両曲線は完全に一致していることが推察される。その極限は、一般土の締固め曲線の完全可逆性に象徴される。以上のことから関東ロームの締固め曲線における非可逆性はアロフェン量の存在による自由水分量の相違によるものと考えられる。Fig. 14 は、アロフェン量が中程度の関東ローム試料について、加水法、および乾燥法による締固めを行ない、その乾燥側試料 (W_d)、最適含水比 (W_{opt})、および湿潤側 (W_w) 試料について pF 試験を行った結果である。この図から、締固め方法のいかんにかかわらず乾燥側の pF-水分曲線は、常に湿潤側試料よりも高含水比側に

Fig. 14. pF curves of compacted samples by drying and wetting process.

くることが分かる。また締固め方法の比較では乾燥法試料が一般的に、相当する加水法試料よりも高含水比側にきている。同一締固め方法について、乾燥側試料が湿潤側試料よりも、高含水比にくる理由は、前者がより多くの空気を含有し、試料飽和時に、より多くの水分を吸収して、一部は非自由水分と化するためと思われる。また加水法、乾燥法による pF-水分曲線の比較では、同一締固め含水比に対して、飽和時における吸水量は同じでも、乾燥法による試料は、加水法による試料よりも、先天的により多くの非自由水分を有し、そのために圧力脱水されないことによるものと考えられる。

4・5 アロフェン量と透水係数の関係

Fig. 15 は、関東ロームのかく乱試料および不かく乱試料について、そのアロフェン量と透水係数の関係を示したものである。試料のいかんにかかわらず、一般にアロフェン量の増加と共に透水係数が増加している。特に、アロフェン量 50% までの透水性の増加が著しいことが分る。関東ロームの工事現場では、場所により、トレンチ掘削溝内の雨水の透水性が著しく異なることが、つとに知られている。この透水性の差異は、アロフェン量の違いによることが、この図から推測される。中空球状のアロフェン量が粒状土内にある程度になるまで、間けきは著しく増加し、そのために透水性は急増する。このある量が 50% であると推測される。

4・6 アロフェン量とせん断強度

Fig. 16 は人工試料による関東ロームのアロフェン量とピークせん断抵抗角の関係である。両者の間にはあまり明瞭な傾向は見えないが、球状粘土鉱物では粗粒土の性格が卓越してくるものと思われる。Fig. 17 はアロフェン量と残留せん断抵抗角間の関係である。これから関東ロームの残留せん断抵抗角は $25^{\circ}\sim 40^{\circ}$

Fig. 15. Relationship between Allophane content and permeability.

Fig. 16. Relationship between Allophane content and peak friction angles.

Fig. 17. Relationship between Allophane content and residual friction angles.

の間にあり、アロフェン量が増えるにつれて、減少する傾向にある。この残留せん断抵抗角が Fig. 16 に示されるピーク抵抗角とあまり変わらないのは、板状粘土鉱物を有する一般土と、大きく異なる。これはアロフェン粘土鉱物が球状なので板状粘土鉱物を有する一般土のように外力によって粒子の配向構造が大きく変化しないことによるものである。

5 結 論

以上の実験結果と考察から次のように結論づけることができる。

- (1) アロフェン含有量と関東ロームの自然含水比、コンシステンシー限界の間には、ほぼ直線関係が存在する。特に液性限界との相関性が高い。
- (2) アロフェン量が多くなるにつれて、従来のアルカリ分散よりも酸性分散の方が有効になってくる。
- (3) アロフェン量が多くなると、石灰処理土、未処理土のいかに問わず、一定 pF 値 ($pF=3.0$ または 4.2) に対する含水比は増加し、水分特性値 ($W_{4.2}$) は減少する。

(4) アロフェン量が増えるにつれて、締固め曲線の乾燥密度は低下して平坦になり、加水法、乾燥法による非可逆性が顕著になってくる。

(5) 同一の締固め方法では、乾燥側試料 (W_d) の pF -水分曲線は、湿潤側試料 (W_w) よりも高含水比側に位置し、締固め方法が違えば、乾燥側のものは、加水法のものよりも高含水比側にくる。

(6) アロフェン量が増えると透水性は増加する。特にアロフェン量 50% までの透水性の増加が著しい。

(7) アロフェン量が増加すると残留抵抗角は減少する傾向にある。

本研究を完成するにあたり、試料の関東ローム採取に、終始ご協力いただいた清水建設横浜支店工事長坂 瑛一郎氏に心から感謝の意を表する。また、一部の実験を担当した歴年の本学宋ゼミ卒研生の諸君に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 関東ローム研究グループ, “関東ローム” (1965) 築地書店
- 2) 高速道路調査会, “関東ロームの土工—その土質と設計施工” (1973) 共立出版
- 3) 久野悟郎, “土の締固め” (1964) 技報堂
- 4) 農業土木学会, 農業土木学会集, 第14号 (1965).
- 5) 土質工学会, 関東ローム (火山灰質粘性土) に関するシンポジウム (1970).
- 6) 吉国 洋, 宇野尚雄, 柳沢学司, “火山灰粘性土”, 土の力学 (Ⅱ) 第2章, p.3 (1984) 技報堂
- 7) 土質工学会, “火山灰粘性土”, 日本の特殊土第2章, p.22 (1974).
- 8) 日本土壌肥料学会, “火山灰土の物理性と工学的性質”, p.99 (1983) 博友社
- 9) L. D. Wesley, *Geotechnique*, **27**, 125 (1977).
- 10) 田中弥寿男, 高橋 悟, 第18回土質工学研究発表会, p.167 (1983).
- 11) E. K. S. O. *et al.*, *Proc. Int. Conf. Engineering Problems of Regional Soils, Beijing, China*, p. 701 (1988).
- 12) 宋 永焜, 第26回土質工学研究発表会 (1991).
- 13) 北川靖夫, 農技研報告, No. 29, p.1 (1977).
- 14) 土質工学会, 土質試験の方法と解説, p.499 (1990).
- 15) 土質工学会, 土の試験実習書, p.81 (1981).
- 16) 発電水力協会編, 最新フィルダム工学, p.47 (1992).
- 17) 岩田進午, 古賀 潔, 土と基礎, **22**, 14 (1974).