まさ土の非晶質物質特性と石灰安定処理効果[†]

西 田 一 彦* 佐々木 清一** 久保井 利達**

Amorphous Materials in Decomposed Granite Soil and Their Effect on Lime Stabilization

by

Kazuhiko NISHIDA*, Seiichi SASAKI** and Yorimichi KUBOI**

The purpose of this study is to clarify the relationship between the degree of weathering and the content of amorphous materials and the influence of amorphous components on the lime stabilization of the soil from the physico-chemical point of view.

The ignition loss and the specific surface area which have been adopted as a criterion of the degree of weathering are related closely to the ratio of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$. This fact means that the ratio can be also used as a criterion of the degree of weathering from the chemical point of view.

In conclusion, the ratio of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ and lime content have a decisive effect on the unconfined compressive strength of the sample stabilized with lime.

Key words : Lime stabilization, Amorphous material, Specific surface area, Ignition loss, Decomposed granite soil

1 緒 言

まさ土の工学的性質および物理化学的性質は、風化度や鉱物組成によって著しく異なる。特に、顕著な特性として、土粒子がぜい弱なために機械的外力を受けると容易に破碎すること。また、水の浸透排水によって、その化学成分の一部が溶脱された結果、物理的・化学的にも土構造が不安定になること。などが指摘されている¹⁾。したがって、風化度と土粒子の化学成分の変化の関係を検討し、工学的性質に及ぼす化学成分の役割りを解明することは、まさ土を建設材料として利用する上でも重要である。

従来の研究においても、この点に焦点を当て土粒子の不安定性の原因が結晶粒子の化学的性質に基づいていると指摘した研究がある²⁾。しかし、工学的には各種の化学成分が土中において移動しやすい非晶質物質として存在しているのか、あるいは移動しにくい結晶状態として存在しているのかを明らかにすることが重要である。

本研究は、風化度の異なる各種のまさ土の非晶質物質を定量し、風化度とその化学成分との関係を検討し、それに基づいて $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ が化学的風化度の基準となりうるかを検討する。さらに、まさ土を石灰で安定

処理した場合の強度が、この指標とどのような関係を示すかを明らかにする。

2 試料と実験方法

実験に使用した試料は、大阪府交野市の土取り場から採取したものである。この土取り場は、風化度が連続して変化している斜面であり、風化度の異なる各種の試料が採取できる。さらに、物理化学的性質を調べる場合、採取した試料を気乾状態で乾燥させた後、 $2000\mu\text{m}$ のフルイを通過させたものを用いている。また、破碎試料は試料を強制的に破碎した後、 $840\mu\text{m}$ のフルイを通過させたものを用いている。

これらの試料の風化度は、強熱減量、比表面積の諸量から判定した。特に、比表面積の測定は、 N_2 吸着に基づく BET 法で決定している。一方、試料中に含有する非晶質物質の化学成分は、原子吸光分析で分析し、その含有量は Hashimoto-Jackson の方法に従って求めた。ただし、この方法で異なることは脱鉄処理において 8N-HCl を用いて洗浄処理を 8 回繰り返すことである。これから、試料の非晶質物質の加積溶出曲線を描くと Fig. 1 のようになる。まず、この図から非晶質物質の含有量を推定することを試みる。この図において、曲線の勾配が一定になる部分に接線を引き、その接線を延長して縦軸との交点の値を求める。つまり、この接線の値が求める非晶質物質の含有量となる。その理由は、土粒子内外の表面に非晶質物質が存在し、

*1 ここでいう非晶質物質という用語は、土中に含まれる非結晶質物質 (Amorphous materials) あるいは結晶質であっても非結晶質物質と同様、化学的に不安定で溶解性の大きい物質を総称して用いることにする。

† 原稿受理 昭和63年1月30日 Received Jan. 30, 1988

* 正会員 関西大学工学部 吹田市山手町, Faculty of Engineering, Kansai University, Yamate-cho, Suita

** 和歌山工業高等専門学校 和歌山県御坊市名田町, Wakayama National College of Technology, Nada-cho, Gobo

Fig. 1. Accumulative dissolution curves of crystal-line and amorphous materials in sample No. 2.

それらは極めて不安定であり、最初の数回の洗浄で容易に溶出してしまふ。しかし、結晶質ばかりからなる場合は、この接線は原点を通ることになる。⁴⁾

試料の石灰安定処理に際し、試料に消石灰 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) を混合し最適含水比で下記の条件で突き固めた。つまり、突き固め試験は、小型モールド ($50\phi \times 100\text{mm}$) と小型ランマー (0.5kgf) を用い試料を3層に分けて詰め、各層13回づつ落下高さ 57.5 cm の下で行った。すなわち、この締固めエネルギーは、JISA 1210 の1.1法に相当する。この様にして石灰添加量を5%, 10%, 15% と変化させて作られた供試体は、ラップでシールし、温度 23°C 、湿度95%以上の恒温恒湿槽内で、養生期間1, 3, 14, 28, 56日間にわたり養生した。そして、各養生後の供試体に対

して、ひずみ速度 $1\%/ \text{min}$ の下で一軸圧縮試験を行い圧縮強度を求めた。

3 実験結果と考察

3・1 試料の物理化学的性質

試料の物理的性質は、Table I のとおりである。風化度の基準として採用した強熱減量と比表面積に基づく、試料の番号が増えるともこれらの値が大きくなっている。つまり、風化度はNo. 1 からNo. 4へと大きくなることが明らかである。また、これらのデータから風化度の大きい試料ほど土粒子の $74\mu\text{m}$ 以下の細粒部分が多くなり、すなわち、風化による土粒子の細粒化現象が明らかである。

一方、この様に風化度の異なる試料の非晶質物質の化学組成は、Table II で示される。この表から、風化度の大きいNo. 4は、風化度の小さいNo. 1に比較して多量の非晶質物質を含むことが明らかである。つぎに、風化度を非晶質物質の化学組成から評価する指標として $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ に焦点を当て検討を試みる。

従来から、風化度を表す指標として測定の容易さ、精度から判断すると強熱減量が最も有効とされている。この強熱減量は鉱物中の構造水や有機物などに深く係わる指標として一般に広く採用されている。特に、まさ土の場合は、他の特殊土に比較して有機物の量は、割り合い少ないため結晶水そのものの量を表わしていると考えてよい。したがって、風化に伴って土粒子構造中の化学組成である SiO_2 、 Al_2O_3 および Fe_2O_3 が溶脱され、それらが非晶質物質あるいは結晶質性粘土鉱物になるにつれて、強熱減量が増加するものと考えられる。その場合、通常の $\text{pH}(5 < \text{pH} < 9)$ 領域では風

Table I. Physical properties of samples.

Sample	Physical properties	Ignition loss (%)	Specific gravity G_s	Specific surface area S_s (m^2/g)	Fraction smaller than $74\mu\text{m}$ (%)	Unified soil classification system of Japan
No. 1		1.87	2.761	3.807	14.92	S-M
No. 2		2.94	2.745	4.568	15.41	S-M
No. 3		3.44	2.700	5.377	17.83	SM
No. 4		6.45	2.739	15.956	28.82	SM
No. 2 (crushed)		3.02	2.732	12.450	30.14	—

Table II. Chemical composition of amorphous materials in samples.

Sample	Amorphous components (%)	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	Total	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ratio
Boiling in 8N-HCL (20 minutes)	No. 1	5.69	5.00	8.68	19.37	0.576
	No. 2	5.76	4.97	7.63	18.36	0.651
Boiling in 0.5N-NaOH (2.5 minutes)	No. 3	3.50	4.68	6.22	14.40	0.752
	No. 4	6.86	10.85	15.16	32.87	0.716

Fig. 2. Relationship between ignition loss and $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ for various samples.

化作用によってケイ酸は徐々に水に溶解して流出するが、水酸化アルミニウムは土中に留って移動しにくい⁵⁾。つまり、風化度が大きくなると $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ が増加すると推定される。そこで、これらの理由に基づいて、強熱減量と $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ の関係をプロットすると Fig. 2 のとおりである。この図から両者の対応はかなり良いことが明らかである。すなわち、この関係は化学的風化度の基準として $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ が使用できることを裏付けるものである。ところで、土を石灰で安定処理する場合、土中の pH に影響されることがある。ただし、本研究では pH の値は土質工学会基準 JSFT7T-1979 土の pH 試験方法に基づいて求めたものである。その pH と $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ の関係は Fig. 3 に示すとおりである。この図から両者の対応もかなり良いことが明らかである。つまり、pH が小さくなると逆に $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ の値が大きくなる。すなわち、アルミニウムの溶解度は pH の中性近傍で著しく低い凹型の曲線を示すため⁶⁾、風化が進み pH が小さくなると逆に $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ が大きくなる傾向と一致している。しかし、石灰で安定処理をする場合、石灰添加後の土中の pH が 12.4 以上なければ最適反応効果が得られないので、対象土の pH の値があまり小さすぎると逆に良い結果が得られないと考えられる。

3・2 石灰安定処理土の強度

Fig. 3. Relationship between pH of soil particle and $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ for various samples.

土の石灰安定処理は、地盤改良において以前から行われてきた手法の 1 つであり、その強度は石灰の添加量、養生期間により左右されるとされている。しかし、まさ土のように非晶質物質を含み、また、その含有量が風化度により異なる土に対し石灰で安定処理を行う場合、非晶質物質と石灰との相互作用を解明していくことが極めて重要である。

石灰で安定処理した風化度の異なる供試体の強度は Fig. 4, 5 に示すとおりである。この図から、まず圧縮強度は石灰添加量と養生期間に支配されていることが明らかである。つまり、各供試体の圧縮強度は石灰添加量が大きくなるほど、また、養生期間が増えるほど大きくなる。特に、養生期間 28 日以後の各供試体

Fig. 4. Effects of lime content and period of curing on unconfined compressive strength of slightly weathered samples.

Fig. 5. Effects of lime content and period of curing on unconfined compressive strength of severely weathered samples.

の圧縮強度に大きな差が現れている。したがって、風化度の影響について見ると風化度の大きい供試体ほど、同じ石灰添加量でも圧縮強度が著しく大きくなる。ところで、このような強度発現を別な見方をすれば、土の主成分は Si, Al, Fe であり、これらの成分はポルトランドセメントの主成分に相当している。しかし、セメントの主成分でもある Ca は、一般に、土中に数パーセントしか含まれていないため、土に石灰を添加することは Ca を補充することになり、土はセメントと同じ状態になるため固化するものと考えられる。つまり、今回の養生法において各供試体作製時の初期含水比と温度を養生期間が経過しても、一定に保つようにしたから土中の非晶質物質 Al, Fe, Si が Ca と反応しやすい状態になるので、長期強度の発現はポゾラン反応によるものと考えられる。

圧縮強度に及ぼす石灰添加量と $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ の影響を表した結果は Fig. 6 に示すとおりである。この図から供試体の圧縮強度は $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ と石灰添加量に大きく支配されていることが明確である。つまり、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ と石灰添加量が大きくなるほど圧縮強度も増えている。さらに、石灰添加量が一定において、圧縮強度は $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ が増えるほど大きくなっている。上記のような石灰と非晶質物質との化学反応に関して、非晶質物質の Si, Al, Fe と石灰の Ca が容易に反応することが原因と報告されているが詳しいメカニズムまでは解明されていない。⁸⁾

Fig. 6. Influences of lime content and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ on unconfined compressive strength of samples at curing time of 56 days.

3・3 土粒子の破碎と安定処理効果

土粒子を破碎した場合について、石灰安定処理強度は Fig. 7 に示すとおりである。この図から破碎した供試体の強度も石灰添加量と養生期間に支配されていることが明らかである。また、石灰添加量が一定であっても破碎した供試体の方が破碎しない供試体の強度に比較して相当大きくなっていることが明らかである。

Fig. 7. Effects of lime content and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ on confined compressive strength of crushed sample No. 2.

このことについて検討すると、破碎した供試体と未破碎のものとは Table I, II から物理化学的性質の相違があることがわかる。まず、土粒子を破碎すると比表面積が大きくなる。また、非晶質物質の $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ は破碎した後も変化がないものと仮定すれば、この関係を図に示したのが Fig. 6 の ●, ▲, ■ の値である。この図から土粒子を破碎すると供試体の圧縮強度が大きくなることは土粒子の比表面積の増大によるものと考えられる。

つぎに、圧縮強度と比表面積との関係は Fig. 8 に示すとおりである。この図から石灰添加量が一定であっても圧縮強度は比表面積が大きくなるほど増加することが明らかである。また、人工的に土粒子を破碎して比表面積を増大した場合でも、その圧縮強度が大きくなることも明らかである。しかし、圧縮強度を大きくするため、土粒子を破碎して比表面積を大きくするには膨大なエネルギーが必要である。したがって、強度を大きくするには非晶質物質量の多く含んだ土を使用する方が望ましいと考えられる。

以上のことから、まさ土を石灰で安定処理する場合、最適設計強度を得るためには対象土を破碎して使用する

Fig. 8. Influences of lime content and Specific surface area on unconfined compressive strength of samples at curing time of 56 days.

るか、また、対象土に対して非晶質物質量の多く含む細粒土を混入することによって、経済的にかつ効果的に処理できると考えられる。

4 結 言

まさ土のような非晶質物質を含んだ土に対して、石灰安定処理効果発現の要因を究明したところ、次のような結論を導くことができた。

(1) 非晶質物質量は、風化度が大きくなると増大する傾向がある。

(2) 風化度の基準に採用した強熱減量と $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ とが良い対応を示す。このことは化学的風化度を表す指標として、この比が有効であることを裏付けるものである。

(3) 石灰安定処理土の強度は、石灰添加量と $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ に支配される。特に、風化度の大きい試料ほど $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ が大きくなり、石灰添加量が一定の下で圧縮強度が増大する。

(4) まさ土粒子の人工的な破碎によって、石灰安定処理の効果を上げることが可能であるが、むしろ、非晶質物質を含む細粒土を混入する方が経済的にかつ効

果的である。

(昭和62年9月18日 土質安定材料シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 松尾新一郎, 土と基礎, Vol. 23, No. 2, 1-8 (1975).
- 2) 例えば, S. Matuo and K. Nishida, Vol. VIII, No. 4, 10-20 (1968).
- 3) I. Hashimoto and M. L. Jackson, 7th, Nat. Conf. on Clays and Clay Minerals, 102-113 (1960).
- 4) 西田一彦, 佐々木清一, 久保井利達, 土質工学会論文報告集, Vol. 24, No. 2, 180-190 (1984).
- 5) 粘土力学研究グループ, 土と基礎, Vol. 12, No. 4, 31-39 (1964).
- 6) G. H. Bolt and M. G. M. Bruggenwert 編著 (岩田進午, 三輪睿太郎, 井上隆弘, 陽 捷行訳), “土壌の化学”, 162-174 (1980) 学会出版センター.
- 7) J. L. Eades and R. H. Grim, H. R. R., No. 139, 61-72 (1966).
- 8) J. B. Q. Carvalho, Proc. of the X Inter. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sweden, Vol. 3, 761-764 (1982).