

# 道路土工におけるベントナイト性土の土質化学的検討（予報）

喜田大三  
辻博和

## 概 要

ベントナイト性土の主要粘土鉱物であるモンモリロナイトは粘土の結晶格子の層間結合が弱く、水和性が高いため、道路土工に際して障害となることが懸念される。そこで某地区のベントナイト性土5点について、従来の土の判別分類に加えて2・3の土質化学的性質を検討した。その結果、興味ある知見が得られたのでここに紹介する。

実験に供した試料はいずれもモンモリロナイト含有量が非常に多いにもかかわらず、可塑性、膨潤性、分散性らの物理的諸性質は道路土工上大きく障害となる程著しいものではなかった。その原因としてはこの粘土鉱物の界面化学的条件が有利に寄与していることが判明した。さらに、5点中の2つの試料については界面化学的性質に加えて、粒子と粒子を結合させる働きを持つ結合物質の1つにあげられる活性鉄が特に多いことによって、なお一層可塑性、膨潤性、分散性らの物理的諸性質の値が低くなっていることも判明した。

## 1. はじめに

わが国には三紀層に由来するベントナイト性土が各所に存在している。三紀層に含まれる砂岩、泥岩、凝灰岩らは固結度が低く、風化して粘土質になり易く、その粘土の主要粘土鉱物であるモンモリロナイトはSi4面体格子2層の間にAl8面体格子1層をはさんだ3層構造を有し、その層間結合が弱く、水和性も高いため、可塑性、膨潤性、分散性らに特異な性質を示す。

その結果、ベントナイト性土を対象とした道路土工に際しては、盛土の崩壊、切り取り法面の地すべり、トンネル工事では異常な膨張性土圧の発生による盤ぶくれなどの事故がおこり、大きな問題となっている。

従来は土の物理的性質を測定し、設計、施工が行なわれてきたが、ベントナイト性土のような特殊土を対象とした工事では、工事をより確実にしかも経済的に遂行するためには、それだけでは不十分であり、工事の設計、施行前にそれら物理的諸性質を発現させる原因となる化学的諸性質、すなわち土質化学的諸性質をも把握しておく必要がある。

このような考えに基づき、本報では、某地区のベントナイト性土について道路土工上障害となるベントナイト性土か否かを判定するため、従来の土の判別分類に加えて、2・3の土質化学的検討を行なった。その結果、このような土質化学的検討が道路土工に際してきわめて重要であることを再認識した。

## 2. 供試土

試料は第3紀神戸層群に含まれる某地区から、肉眼観察を行ない色調の異なるベントナイト性土を5種類試料1～3については地表下約0.5m、試料4・5については地表下約5mの土を採取した。採取地点の近辺にはベントナイトの掘削鉱山が存在していた。

なお、神戸層群の地域では毎年新しい地すべりによる被害が約80箇所、約2700haと増加しているが、当地区では地すべりはおこっていない。

湿潤原土の土色と主な観察事項を表一1に示す。土色は新版標準土色帳（農林省監修）によった。

試料	土 色	その他観察事項
1	緑黒色 7.5GY%	緻密で粘性に富む
2	黄褐色 2.5Y%	"
3	オリーブ黄色 5Y%	緻密だが多少粗
4	オリーブ褐色 2.5Y%	緻密で粘性に富む
5	灰オリーブ色 5Y%	緻密だが多少粗

土塊が赤黒色(2.5Y R%)の構造表面(厚さ約1cm)を持つ

表一1 供試土の土色と主な観察結果

## 3. 構成鉱物の検討

### 3.1. 構成鉱物の同定

3.1.1. 実験方法 風乾全土と、粘土鉱物を明確にするため2 $\mu$ 以下の粘土、加えてグリセロール処理後とについてX線分析を行なった。また、X線分析の結果を確認するため、2 $\mu$ 以下の粘土について電子顕微鏡観察も行なった。

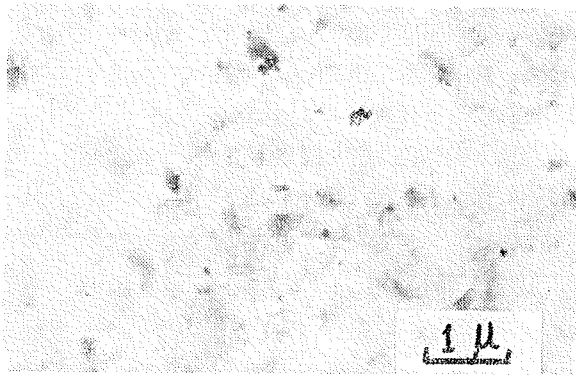
3.1.2. 実験結果と考察 鉱物分析の結果を表一2に示す。以下これら鉱物の同定経過を述べる。

試料	1次鉱物	粘土鉱物
1	石英・長石・ $\alpha$ -クリストバライト	モンモリロナイト
2	" " "	"
3	" " " ・カルサイト	"
4	" " " "	"
5	" " " ・雲母	モンモリロナイト・微量のカオリナイト

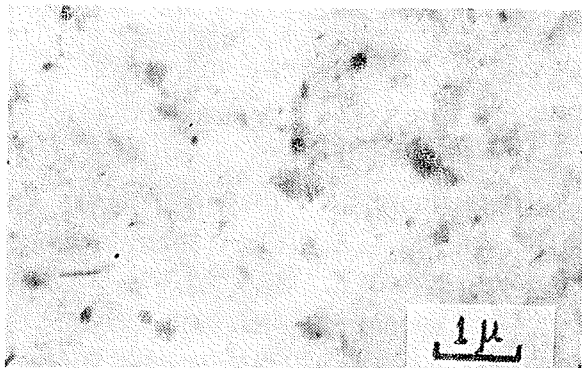
表一2 試料の構成鉱物の種類

全試料とも、X線回折図にモンモリロナイトの(001)(003)(020)あるいは(110)のピークが見られ、グリセロール処理によって(110)のピークが17.7Åに移ることからモンモリロナイトと判定した。2 $\mu$ 以下の粘土については試料1~4ではモンモリロナイトのみ、試料5についてはモンモリロナイトの他にわずかではあるがカオリナイトのピークが見られた。さらに、電子顕微鏡観察ではどの試料もふわふわした綿毛様を呈した無定形の集合体が観察され、主要粘土鉱物はモンモリロナイトと判定した。

試料5については電子顕微鏡観察ではカオリナイトは確認できず、存在するにしてもその量は少ないと思われる。なお、電子顕微鏡写真を試料4と5について図一1、図一2に示す。



図一1 試料4の粘土の電子顕微鏡写真



図一2 試料5の粘土の電子顕微鏡写真

また、モンモリロナイトについては、X線回折図の(001)のピークが全試料14.9Å~15.2Åの間にあり、4章で述べるように交換性陽イオンの70%以上をCaイオンが占めていることなどからCa型と判定した。

一次鉱物としては、いずれも石英、長石、 $\alpha$ -クリストバライトを含み、ごく少量ではあるが試料3にカルサイト、試料5に雲母が認められた。

3.2. モンモリロナイト含有量の測定

3.2.1. 実験方法

(1) 塩基交換容量による方法 塩基交換は粘土鉱物特有の現象であり、その容量(CEC)は表一3に示す通り粘土鉱物の種類によって大きく異なる<sup>1)</sup>。特にモンモリロナイトでは高い塩基交換能を示す。

粘土鉱物	CEC実測値
バーミキュライト	100~150(meg/100g)
モンモリロナイト	80~150
イライト	10~40
クロライト	10~40
カオリナイト	3~5

表一3 主な粘土鉱物のCEC実測値

また、石英、長石なども塩基交換能を有するが、その容量は粘土鉱物のそれに比べて無視できる。したがって試料中の粘土鉱物としてはモンモリロナイトがほとんどであることから、試料のCECの値は含有するモンモリロナイトの量によると考えられる。

そこで、試料1~4の1 $\mu$ 以下の粘土をとり、これを純粋のモンモリロナイトとして、そのCECを求め、この値を標準値として、試料に含まれるモンモリロナイト含有量を算出した。

なお、CECは、吸着している陽イオンを酢酸アンモニウムで置換し、置換した全アンモニウム量をホールモール法で測定した。

(2) グリセロール吸着による方法 モンモリロナイトがその層間に110°Cグリセロール雰囲気中で、安定にグリセロールの単分子層を吸着する性質を利用し、その吸着量を重量法で求め<sup>2)</sup>、モンモリロナイト含有量を算出した。なお、標準値としては、CECによる方法の時と同様1 $\mu$ 以下の粘土から求めた

3.2.2. 実験結果と考察 実験結果を表一4に示す。

CEC法によって求めたモンモリロナイト含有量はグリセロール吸着法のそれよりわずかに大きい値を示したが、値の大小はほぼ対応している。現在、筆者らは土中のモンモリロナイト含有量のより一層正確な測定法を検討中であるが、ここでは、両法の値の平均値をもって試料のモンモリロナイト含有量とした。

試料	CEC法		グリセロール吸着法		(1)と(2)の 平均値
	CEC(me/100g)	Mt含有量(1)	吸着%	Mt含有量(2)	
1	51.8	57.1	9.3	54.1	55.6
2	43.1	47.5	7.1	41.3	44.4
3	41.9	46.2	7.2	41.9	44.1
4	46.5	51.2	7.2	41.9	46.6
5	29.1	32.1	4.9	28.5	30.3
標準値	90.8	100	17.2	100	

表一4 試料のモンモリロナイト含有量

#### 4. 物理的諸性質の検討

##### 4.1. 実験項目と実験方法

(1) 含水比 JISA1202による。

(2) 粒度分析 音波処理後、アルカリで完全に分散せしめ、ストークスの法則により、ピペット法で測定する。

(3) コンシステンシー限界 JISA1205 および JISA1206による。

(4) pF水分特性 遠心分離機を用いて、乱さない試料について pF4.1 における非分離水量と分離水量を測定し、pF4.1 における pF 水分特性値を算出する。

##### 4.2. 実験結果と考察

試料の物理的諸性質を表一5に示す。

試料	含水比	粒 径 分 布					土 性	コンシステンシー限界※				日 本 分 類	pF4.1の水分特性値
		>0.2	0.02	0.002	>mm			LL	PL	PI	Ac		
1	46.1	3.1	12.2	33.6	51.1	粘土	110.9	44.6	66.3	1.30	CH	0	
2	32.8	13.2	9.5	32.2	45.2	粘土	81.3	34.3	47.0	1.06	CH	0	
3	43.4	12.6	35.3	8.0	44.1	粘土	82.4	33.1	51.1	1.16	CH	0	
4	10.9	0.3	30.2	26.5	43.0	粘土	52.5	27.6	24.9	0.62	CH	7.5	
5	21.2	2.2	43.5	24.0	30.3	粘土	40.5	15.3	25.2	0.83	CL	2.6	

※ LL(液性限界)・PL(塑性限界)・PI(塑性指数)・Ac(活性度)

表一5 試料の物理的諸性質

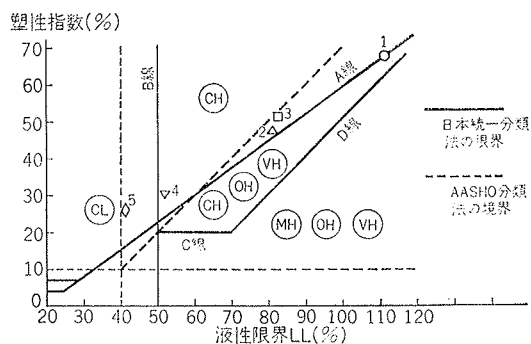
##### (1) 粒度分析

土性は JISA1204 の粒度組成の3角座標から全試料とも「粘土」と判定された。

2 $\mu$ 以下の粘土含有量と表一4のモンモリロナイト含有量から、2 $\mu$ 以下の粘土がほとんどモンモリロナイトであると推定される。このことは2 $\mu$ 以下の粘土についてのX線分析で、試料5ではカオリナイトがわずかに認められたが、他の試料ではモンモリロナイトのピークしか認められなかったことから裏付けられる。

##### (2) コンシステンシー限界

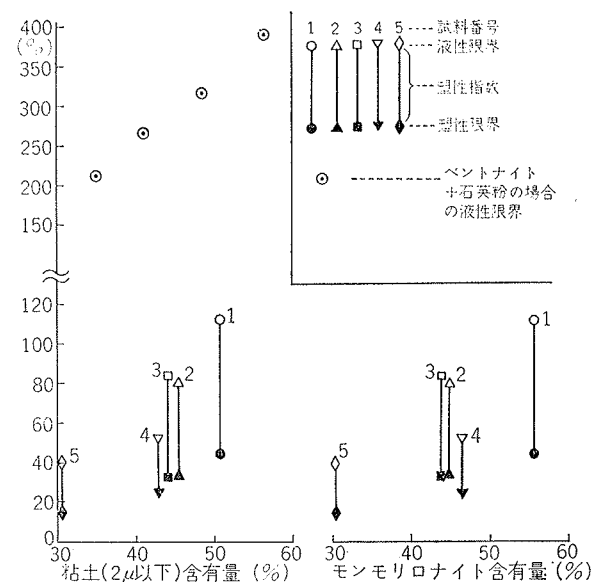
図一3に示されるように、塑性図上では、全試料ほぼA線に沿ってプロットされ、日本統一分類法によれば、試料1~4がCH塑性の高い無機質粘土、試料5がCL中塑性の無機質粘土と判定された。さらに、表



図一3 塑性図

一5に示されるように粘土分の塑性指数を表わすのに有用といわれている活性度(塑性指数/2 $\mu$ 以下%)は0.62~1.30の範囲であった。

ところで、全試料とも2 $\mu$ 以下粘土含有量あるいはモンモリロナイト含有量が30~55%とかなり大きいにもかかわらず、液性限界(図一4参照)、塑性指数(図一5参照)、活性度は低い値を示した。



図一4 液性限界、塑性限界と粘土含有量、モンモリロナイト含有量の関係

そこで、この原因を明らかにするために、土粒子の水和能力、保水能力に鋭敏に作用してくると思われる粘土表面の界面化学的性質、有機物の含有量、さらには粒子と粒子を結合せしめる活性酸化物(特に活性鉄)の量などの化学的諸性質について次章で検討している。

##### (4) pF水分特性<sup>5),6)</sup>

土工施工に際して、水の存在は単に含水比として表わされる水の量ばかりでなく、その存在形態すなわち土中の水の持つエネルギーの準位が大きな問題となってくる。特に繰り返しの繰り返しによって軟弱化し、トラフィックビリティの低下をひき起す黒ボク・灰土などではこ

の問題が大きな意味を持っていることが明らかにされている。

繰り返しによる土の軟弱化の度合を判定する1つの指標とし、pF水分特性値を、「pF4.1に相等するエネルギー（約12.5kg/cm<sup>2</sup>）を土中水に与えたとき分離してくる水分の量と自然含水比との比である」と定義し<sup>5)6)</sup>、試料のpF水分特性値を求めた。その値は表—5に示されるように、すべて0または1桁のオーダーの低い値を示し、繰り返しによる軟弱化はおこりにくいと判定した。

### 5. 化学的諸性質の検討

#### 5.1. 実験項目と実験方法

- (1) 水素イオン濃度(pH) H<sub>2</sub>O, 1NKClでそれぞれ10倍に希釈し、ガラス電極で測定する。
- (2) 全炭素 パーン・スライク法による。
- (3) 交換性陽イオン CEC測定に際し、酢酸アンモニウムで抽出されてきた陽イオンを、Ca・MgイオンについてはEDEAによるキレート滴定で、Na・Kイオンについては炎光分析で測定する。
- (4) 活性鉄 ハイドロサルファイトで還元し、EDTAとキレートを形成した鉄をO-フェナントロリンで比色定量する。
- (5) 膨潤度 毛管湿潤法で行ない、乾土1gあたりの吸着水量(g)で表わす。
- (6) 分散度 完全分散時の粘土%に対する無処理分散時の粘土%の百分率として表わす。

#### 5.2. 実験結果と考察

試料の化学的諸性質を表—6に示す。

全試料ともpHがほぼ中性から弱アルカリ性で、塩基飽和度が100付近の値であることは、モンモリロナイト質粘土としては妥当である。

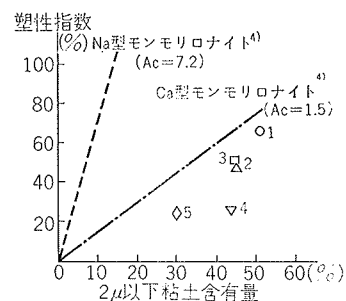
全炭素については、全試料とも1%以下と少なく、試料に含まれる有機物が土の可塑性、膨潤度らの物理的諸性質に与える影響は少ないと考えられる。

試料	pH		全炭素(%)	交換性陽イオン(meg/100g)					CEC(meg/100g)	塩基飽和度	活性鉄(%)	膨潤度	分散度
	H <sub>2</sub> O	KCl		Na	K	Ca	Mg	計					
1	8.3	7.3	0.60	1.2	0.9	56.4	4.7	63.2	51.8	122	0.39	2.3	29.5
2	7.8	6.8	0.28	1.5	1.1	35.2	4.2	42.0	43.1	97	0.31	2.0	34.4
3	7.7	6.8	0.13	1.4	0.5	40.9	4.6	47.4	41.9	113	0.36	2.1	27.0
4	7.3	6.1	0.02	7.2	1.3	35.9	8.1	52.5	46.5	113	1.63	1.7	19.1
5	7.6	6.3	0.03	1.3	0.8	23.8	7.6	33.5	29.1	115	1.56	1.2	8.9

表—6 試料の化学的諸性質

交換性陽イオンについては、一部が1価のNa, Kイオンで、大部分が2価のCa・Mgイオンであり、しかもCaイオンが全交換性陽イオンの70~90%を占め、塩基飽和度と考え合せると、モンモリロナイトはCa型であると判定される。これらのCaイオンは大部分粘土の結晶格子の層間に吸着されており、粘土粒子の界面化学的性質を大きく支配し、Ca型モンモリロナイトはNa型モンモリロナイトなどに比べ水和性が低いため、液性限界、塑性指数などの物理的性質の値が低くなっていると判定した。

図—5に示すように2μ以下粘土含有量と塑性指数の関係は、試料4を除いて、Samuelsが示したCa型モンモリロナイトの場合とほぼ一致しており、上述のことを裏付けていると思われる。



図—5 2μ以下粘土含有量と塑性指数の関係

このことは表—6に示されたように膨潤度・分散度についても確認される。

膨潤度は表—7に示すように交換性陽イオンによって大きく左右されることが知られており、膨潤度に対してもCa型モンモリロナイトの低い水和性が大きく影響していると思われる。

交換性陽イオン	Na	Li	K	Ca	H
モンモリロナイトの膨潤度	11.1	10.8	8.6	2.5	2.2

表—7 膨潤度に及ぼす陽イオンの影響

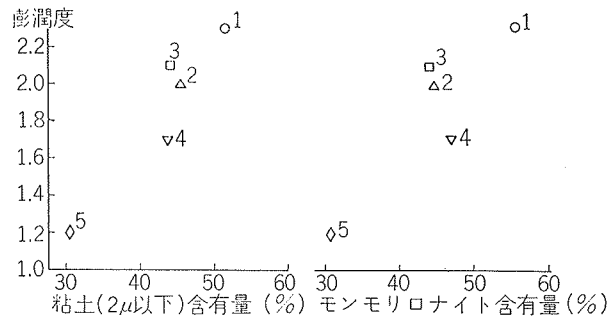
分散度については、Ca型モンモリロナイトの低い水和性に加えて、Ca型モンモリロナイトの持つ動電的性質すなわちジータ電位が低いいため、粘土粒子が相互に接触しやすくなり、凝集しやすい状態があるので分散度が低い値を示していると判定した。

つぎに、2μ以下粘土含有量あるいはモンモリロナイト含有量とコンシステンシーの諸性質との関係、さらには膨潤度との関係について論じる。前者の関係についてはすでに図—4, 5に示した、後者の関係については図—6に示す。

2μ以下粘土含有量あるいはモンモリロナイト含有量が増加するのに対

応して、コンシステンシーの諸性質および膨潤度が増加することは当然のこととして予想される。

しかし、試料4については、試料2・3と2 $\mu$ 以下粘土あるいはモンモリロナイトの含有量がほぼ同じであるにもかかわらず、各性質ともにその値は試料2,3に比べてかなり低い値を示した。



図一六 膨潤度と粘土含有量・モンモリロナイト含有量の関係

この原因としては、表一六に示されるように活性鉄が多いことによると思われる。すなわち、活性鉄のような活性酸化物は、一般に、粒子と粒子を結合させる結合物質としての働きが大きいと言われており<sup>7)</sup>、その働きによって、粒子と粒子が他の試料に比べて強い結合状態にあり、その結果、土の水に対する安定性が増しているためと推定される。このことは活性鉄含有量の多い試料5についても当然作用していると考えられる。

また、図には示さなかったが、試料4・5の活性鉄の多いことは表一六に示されるように分散度にも大きく影響し、他試料に比べてより一層低い値にしていると言えるであろう。

## 6. まとめ

ベントナイト性土の主要粘土鉱物であるモンモリロナイトは粘土の結晶格子の層間結合が弱く、水和性が高いため、土の可塑性・膨潤性・分散性に特異な性質を示す。その結果、道路土工に際し、障害となることが懸念される。そこで、本報では某地区のベントナイト性土5点について、土の判別分類に加えて、土質化学的性質を検討し、以下のような結果が得られた。

(1) 全試料とも主要粘土鉱物としてモンモリロナイトを30~55%含む粘土であった。

(2) 上記のように、モンモリロナイト含有量がかなり高いにもかかわらず、日本統一分類法によれば、試料4点は、CH、1点はCLと分類され、また膨潤性・分散性らの物理的諸性質の値は比較的低いものであった。その原因は、この粘土鉱物の界面化学的性質によるものと判定した、すなわち、粘土粒子に吸着されて

いる交換性陽イオンの一部が1個のNa・Kイオンで、大部分が2個のCa・Mgイオンで占められており、しかもCaイオンが主要な交換性陽イオンであった。

(3) また、モンモリロナイト含有量の増加とともに、液性限界・塑性指数、膨潤度、分散度らの物理的諸性質の値も増大する傾向を認めた。しかしその際、一部の試料については、これらの値が低く、粒子と粒子を結合させている結合物質の1つにあげられる活性鉄が物理的諸性質に関与していることを見出した。

(4) pF水分特性値として、全試料低い値をとり、繰り返しの軟弱化はおこりにくいと推定した。

以上から、道路土工に対する障害度を総合判断すると、モンモリロナイト含有量は大きいけれども、物理的諸性質は道路土工上障害となる程著しいものではなく、全試料注意して使用すれば、特に問題になってこないと判定した。

なお、今後、ベントナイト性土を対象とした道路の設計施工の技術をより一層進歩させるために、土の工学的性質らに対する土質化学的性質の関係を明確にして行く予定である。

## 謝辞

本研究にあたって、試料採取時には現場の方々にも多大な御便宜を計っていただいた。また実験の一部は技術研究所の斎藤裕司職員によるものである。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Grim, R. E.: Applied Clay Mineralogy, (1962)
- 2) Kinter, EB・Diamond, S.: Gravimetric determination of monolayer glycerol complexes of clay minerals, Clay and Clay Minerals, 5, 318~333 (1958)
- 3) 河内・藤井・野々垣: 土の判別分類に関するシンポジウム講演集, 9~14 (1969)
- 4) Samuels, S. G.: The effect of base exchange on the engineering properties of soils, Building Research Station Note, No C176 (Watford)
- 5) 喜田・中田: 高含水比火山灰質粘性土における土中水エネルギー測定の意味, 大林組技研報, 2, 149~154 (1964)
- 6) 喜田・中田: 関東ローム(火山灰質粘性土)に関するシンポジウム講演集, 39~48 (1970)
- 7) 喜田: 土壌構造と結合物質の作用および改良剤の利用に関する研究(学位論文) (1961)