

RIIS-TN-77-10

UDC 548.734 : 549.6 : 624.131 : 669.953

産業安全研究所技術資料

TECHNICAL NOTE OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

1978

粘土鉱物の石灰処理

前 郁 夫

鈴木 芳 美

労働省産業安全研究所

粘土鉱物の石灰処理

前 郁 夫*
鈴木 芳 美*

Lime treatment of clay minerals

I. Mae*
Y. Suzuki*

For considering the safety of various methods of soil stabilization or chemical grouting, the investigations from chemical and geochemical points of view about these methods are necessary.

In this study, in order to get the fundamental data of chemical changes about lime treatment of clay minerals, three kinds of clay mineral (kaolinite, montmorillonite and pyrophyllite) are chosen.

Reagent grade $\text{Ca}(\text{OH})_2$ was used for preparing lime-clay mixtures at few levels of lime content based on the dry weight of the clay.

After additioning the calculated amount of distilled water and kneading thoroughly, lime-clay mixtures were compacted to maximum density at optimum moisture content by the use of Havard Miniature Compaction Apparatus.

Compacted specimens were sealed carefully to minimize moisture loss and carbonation during curing and they were cured at the room temperature or high (60°C) temperature.

Physical properties such as unconfined compressive strength of compacted specimens were measured and mineralogical changes of these specimens were followed by the X-ray diffraction analysis. These experiments were made for the each kind of clay, of lime amounts and of curing time.

The results of these experiments may be summarized as follows.

(1) Unconfined compressive strength of each compacted specimens of lime-clay mixtures were generally developed according to the length of curing time; curing period for strength appearance was 2-10 weeks at room temperature curing and 2-4 days at high temperature curing. (Fig.5-10)

(2) The amounts of lime in the lime-clay mixtures could be measured by means of the relative strength of diffracted X-ray. (Fig.11)

(3) X-ray diffraction patterns for each lime-clay mixtures proved that the relative strength of diffracted X-ray for lime weakened according to the length of curing time and that reaction products were formed in kaolinite-lime mixtures at high temperature curing and montmorillonite-lime mixtures. (Fig.12-20)

(4) These reaction products were calcium aluminate hydrate in kaolinite-lime mixture and calci-

* 土木建築研究部 Civil Engineering & Construction Research Division

um silicate hydrate in montmorillonite-lime mixtures. In pyrophyllite-lime mixtures, any reaction products was not detected. (Fig.12-20)

(5) The decreasing amounts of lime in lime-clay mixtures had tendency to be constant having no relation to initial amounts of lime in the mixtures. (Fig.21)

(6) The relations between the changes of unconfined compressive strength and the changes of relative strength of diffracted X-ray for lime were indicated as straight lines. (Fig.22-25) The point of relation between both characters was moved on the line to upper according to the length of curing time. This indicate the possibility of conclusions about the final strength of lime-clay mixtures and about the initial amount of lime or the curing time to obtain the requiring strength.

1. ま え が き

昨今の建設工事は技術的にも社会的にも各種のきびしい条件のもとで行なわれることが多くなってきている。このため地盤条件が不良の場合には工事の実施にあたっては地盤改良により作業の安全・構造物の安定・作業の能率化などを計るため各種の注入工法や安定処理工法が必要とされるようになってきた。このため地盤の改良を目的とした各種の新工法の開発が進められ施工の実施も相次いでいる。

土質（あるいは地盤）安定処理工法のひとつとして道路建設等において有効性を認められてきた石灰処理工法は、古くからの歴史を有しこれまでに多くの施工実績やあるいは石灰処理反応機構の解明の研究もなされてきている。さらに最近では軟弱地盤の改良工法のひとつとしてあるいは公害ヘドロの封じ込め工法としてまたあるいは省資源・再資源化の技術開発のひとつとして掘削残土等の材料転換などにも用いられるようになってきている。

このような石灰による土処理・地盤処理は単に力学的な地盤処理の考え方の基礎となるばかりでなく、自然地盤に施す各種の安定工法に対して示唆に富む要素を数多く包含している。

薬液注入工法による地下水汚染の問題にもみられるように自然地盤に対する薬液や処理剤の種類・量あるいはそれらの反応過程などについての討論は、工事の安全性の確保とも密接に関連する問題でもある。

しかしながら現在までの各種の石灰処理工法についてはある種の設計基準あるいは指針と言ったものがあるわけではなく、特に自然地盤との間の化学的な側面については、自然地盤が有する複雑さと多様性のために系統的・定量的な検討が十分なされてきたわけではない。

これまでの石灰処理による土質安定に関する研究をみると、その要因が多岐にわたるためいろいろな立場から各種の研究がなされている。その中で化学的側面からの研究は特定の土（例えば日本においては関東ローム・真砂土など）を対象としたもので^{1), 2)}、比較的早くから取りあげられてきた。それは石灰処理工法が化学的には石灰と粘土鉱物との間の安定化作用すなわち水和作用あるいはポゾラン反応等を利用する理由から、粘土鉱物を多く含有する火山灰質土のような一般的に

は粘性土と呼ばれる土には特は有効であることによる。したがってこれらの研究^{1)~5)}はソイルライムにおける粘土のポゾラン反応の研究の一系統として位置づけられる。

最近ではさらに、これまでになされてきたポゾラン反応についての一応の解明にあきたらず各種の要因を再吟味し土・石灰混合系の反応過程や反応生成物等について検討をはじめたもの^{3~6)}、あるいはまた粘土鉱物のイオン交換による土質安定をはかる化学的立場からの研究⁷⁾なども行なわれるようになってきた。

しかしながらそれらの研究対象となっている粘土鉱物はモンモリロナイト系粘土及びカオリナイト系粘土についてのものがほとんどである。粘土鉱物の種類は多岐にわたり粘土鉱物種により安定処理効果にも大きな影響があることはすでに知られてはいるが¹⁾、それらは特定の土に対する研究の過程でイライト・ハロイサイト・アロフェンといったごく限られた粘土鉱物種について定性的に知られたものにすぎない。

モンモリロナイト、カオリナイトは自然地盤中にもよく見られ石灰処理効果も大きな粘土種であるが、このほか比較的の不活性な粘土鉱物種についても同様の検討を積重ねて行く事は、自然地盤の多様性を考慮した場合必要なこととなる。

このような観点から石灰処理の化学的側面に関する事項についての基礎的な検討が要求される。筆者等は第一段階としてカオリナイト・モンモリロナイトの他にパイロフィライトを主体とする各粘土を対象に各々石灰処理を施し、それらの鉱物学的変化を主にX線回折試験により、また処理効果を一軸圧縮強度測定を中心に追跡した。本報告はこれまでに得られたそれらの結果について述べたものである。

2. 粘土鉱物について

土質工学の分野では粒径 2μ 以下の粒子からなる細粒土あるいは土中の細粒分を「粘土」と呼ぶ。これらの粘土はその主体は粘土鉱物よりなる微粒子の集合体である(注)。その粘土鉱物は主として Si, Al, Mg, H_2O などからなる微細な鉱物でいくつかの例外を除くと層状の含水ケイ酸塩である。詳しくは成書⁸⁾にゆずるが、Si-O 四面体層あるいは O-OH などの八面体配位をな

(注) 土質分類等では粒径のみを問題とするので石英微粒子集合体のような粘土鉱物を全く含まない「粘土」も有り得る。

す陽イオンで構成される層とよになっている。各層はイオンの種類により負電荷を有することが多くそのため層間に陽イオンをはさんだりする。それらの各層の重なり具合・層間に物質をはさむか否か等の鉱物の構造タイプによりカオリナイトに代表される 1:1 型粘土鉱物あるいはモンモリロナイトなどの 2:1 型粘土鉱物などに分類することができる。これらを表 1 に示す。

表 1 粘土鉱物の種類⁸⁾

粘土鉱物例 (含総称名)	鉱物の構造タイプ	層間の物質
カオリナイト	1:1 型	なし
ハロイサイ		H ₂ O 分子層
加水ハロイサイト		H ₂ O
サーペンティン類		なし
タルク	2:1 型 (非膨張型)	なし
パイロフィライト		
イライト		
雲母類		K イオン・Na イオン等
モンモリロナイト	2:1 型 (膨張型)	H ₂ O 分子層
パーミキュライト		交換性陽イオン・ H ₂ O 分子層
クロライト類	混合層型	八面体層
アタパルジャイト	鎖状	
セピオライト, 他		
アロフェン	非晶質	

これらのうちカオリナイトは火山岩の熱水変質鉱物としてあるいは雲母・長石類の風化生成物として堆積岩や土中に多く存在し耐火原料・製紙原料などとしても利用される。その構造は四面体一層と八面体一層とが結合したものを単位とする 1:1 型構造を有する。

またパイロフィライトはろう石などの主要構成鉱物であるが長石類の変質物として産出する。その構造は四面体二層と八面体一層とが結合した 2:1 型構造と呼ばれる粘土鉱物類の中で最も基本的な形を有するものである。各層は電氣的にバランスしており層間には陽イオンを持たない。したがって各種の粘土鉱物の中では最も不活性なもののひとつと言える。

モンモリロナイトも 2:1 型構造を有する粘土鉱物の代表であるが、2:1 型構造の単位層の間に水分子

層をはさみさらに複雑に積重なる構造を有する。それらの層間水分子層は外界の水量・水蒸気圧の変化により水分子を積極的に吸い込み層間を大きくするという内部膨潤の性質を有する。また粒子間にも積極的に水を吸収するかなり大きな外部膨潤性をも有している。これらの理由によりモンモリロナイトは他の粘土鉱物に比較してとりわけ大きな膨潤性とイオン交換能を有している。また上記のモンモリロナイトの結晶格子の層間隔は層間の陽イオンによっても影響をうけ例えば Ca モンモリロナイトは他のモンモリロナイトに比較してより高次の加水物となる傾向があることが知られている。新生代第三紀の頁岩層の例など自然地盤には多く含まれていることがあり土木工事においてはその吸水膨潤性のため崩壊・はらみ出し・押し出し・地すべり等の原因となる。一方、ボーリング孔の周壁・連続地下壁工事の際の掘削壁面の安定のための泥水などとして有効利用もされている。

3. 実験方法

一連の室内実験を図 1 に示す流れにしたがって行なった。詳細については以下に述べる。

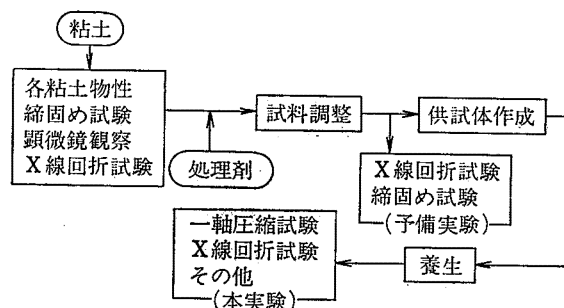


図 1 各種実験の流れ図

3.1 粘土試料の物性について

各理対象として選定した粘土(注)はカオリナイト(市販試薬)・モンモリロナイト(山形産市販ペントナイト)・パイロフィライト(広島産市販)の三種である。

いずれも粉末X線回折試験及び透過型電子顕微鏡による観察により構成鉱物の確認などの定性的な同定を行なった後、JIS あるいは土質工学会などにより定め

(注) 本報告では誤解のない範囲で、ある種の粘土鉱物を主とする集合体をその粘土鉱物名あるいは、単に「粘土」と呼ぶことにする。

られている方法⁹⁾にしたがって粒度分布測定・比重測定・コンシステンシー測定・塩基置換容量 (C. E. C.) 測定・pH 測定を行なった。但し塩基置換容量測定は通常用いられる浸出管による方式に依らず遠沈管中で攪拌して遠心分離により上澄液を取捨する簡便法に依った¹⁰⁾。また各粘土についてハーバード型小型締固め試験装置を用いて各粘土の締固め曲線を求め、一軸圧縮試験用供試体を作成する際の諸条件及び供試体作成方を決定した。

3.2 試料の調整及び供試体の作成

3.2.1 処 理 剤

処理剤として選定したのは、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ であるが他に一部 MgO , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ を用いた実験も行なった。いずれも一部を除いて市販特級試薬を用いた。

3.2.2 試 料 調 整

各粘土は室温で気乾状態にした後処理剤を加え十分に混合する。処理剤の混合量は原粘土重量に対する 0~30% 間の数段階 (予備試験) 及び 0~20% 間の 3~4 段階 (本実験) を選定した。混合後の試料は締固め試験の結果より判明している原粘土に対する最適含水比となる蒸留水を加え十分混練し大部分を締固め供試体の作成に供した。一部はそのまま密閉容器中で養生 (以後「締固め未処理試料」と呼ぶ) した。

3.2.3 締固め供試体の作成

前述のハーバード型小型締固め試験装置を用いて調整済の試料を 3 層 25 回で締固め直径 33.3mm 高さ 71.9mm の円柱状の供試体を作成した。同一条件のもとで各粘土について処理剤混合量の各段階毎に 36 ないし 48 個の供試体を作成した。供試体は作成後直ちにポリ塩化ビニリデン樹脂膜及びビニール等により厳重に密閉状態として含水比の低減・炭酸化作用を除外した。

3.2.4 養 生

密閉容器中の締固め未処理試料及び密閉状態とした締固め試料は室温状態で (一部については高温 (60°C) の状態) で予定養生日数が経過するまで定湿容器中で養生し、それらを処理剤の混合量あるいは養生期間別に一軸圧縮試験・X線回折試験等に供した。

3.3 予 備 試 験

3.3.1 X線回折試験による処理剤の検討

調整直後及び養生期間毎に締固め未処理試料につい

てX線回折試験を行ない処理剤の差異による反応の進展についてチェックした。

3.3.2 処理剤の混合による締固め特性の変化

各粘土について石灰混合量の各段階毎に調整直後の試料を用いて締固め試験を行ない締固め特性を求めた。

3.4 本 実 験

3.4.1 一軸圧縮試験

養生後の締固め供試体を用いて JIS に定められた方法に準じて一軸圧縮試験を行なった。同一条件 (粘土種・石灰混合量・養生期間・養生温度) の試料 3 個について試験を行ない石灰処理による処理効果 (強度発現状況) を検討した。試験後の試料は直ちに含水比を測定しその含水比が調整時の含水比と比較して 5% 以上低下している試料については結果を除外することとした。さらに残りの試料はX線回折試験に供した。また一部についてはさらに pH 測定・コンシステンシー測定を行なった。

3.4.2 X線回折試験

調整直後及び養生後の締固め未処理試料、一軸圧縮試験後の締固め供試体についてX線回折試験を行ない処理剤の消長・粘土鉱物の回折線の変化・反応生成物の消長及びその同定等について詳細な比較検討を行なった。

X線回折試験にあたっては、アセトンによる脱水・乾燥を行ないまた不定方位性の保持等に注意を払い試験条件が一定になるよう努めた。

4. 結 果 と 考 察

4.1 粘土試料の物性

今回石灰処理の対象とした三種の粘土について実験等により得られた物性は 2 表に示すとおりである。

4.2 X線回折試験による処理剤の検討

ソイルライムの材料として市販されているものの中にはドロマイト系処理剤として $\text{MgO} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ あるいは $\text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2$ などがありその処理効果・反応過程等についての研究も幾つかなされている。それによると Mg は触媒として作用する (触媒作用に関しては他に異論もある) と考えられ本質的に

表 2 処理対象粘土の物性

粘 土 種 類		カオリナイト	モンモリロナイト	パイロフィライト
構 成 鉱 物	主たる粘土鉱物	Kaolinite	Montmorillonite	Pyrophyllite
	その他の鉱物等	ほとんど無	石英 (微量) 長石 (")	Kaolinite (微量) ・ 石英
コンシ テンシー	PL (%)	36.1	25.5	40.2
	LL (%)	54.4	351.0	58.1
	Ip	18.3	325.5	17.9
比 重		2.666	2.574	2.661
2 μ 以下含有量 (%)		82.0	61.0	30.0
アクティビティ		0.22	5.34	0.60
締固め試験	O. M. C (%)	42.0	37.0	37.0
	$r_{d \max}$ (g/cm ³)	1.205	1.276	1.255
C. E. C (meq/100g)		16.7	76.1	11.4
pH	H ₂ O	6.3	9.9	4.0
	KCl	5.1	8.5	4.0

粘土との反応に係わるのは石灰分である³⁾とされている。

したがって今回はこれらの確認のため予備実験のひとつとして、締固め未処理試料として各粘土に Mg(OH)₂, MgO 処理を施した場合の経時変化を X 線回折試験により追跡し Ca(OH)₂ 処理の場合と比較した。その結果 Mg(OH)₂, MgO を処理剤とした場合は処理剤の消長・反応生成物の生成などの変化は X 線的には全く認められなかった。これらの結果などから後述する各試験については Ca(OH)₂ (以下本報告では単に「石灰」と呼ぶ) を処理剤として用いたものについてのみ行なっている。

4.3 イオン交換したモンモリロナイトの面間隔の検討

今回実験に供した三種の粘土のうちモンモリロナイトについては、その交換性陽イオンは Na が主であるいわゆる Na-モンモリロナイトであった。前述のようにモンモリロナイトの結晶格子の c 軸方向の面間隔は層間の水分子と陽イオンにより影響を受ける。そこで塩基置換容量測定法に準じて原モンモリロナイトに数種の陽イオン交換を施し、イオン交換後の試料について X 線回折試験により (001) 面間隔 (底面反射) を測定した。Ca 置換モンモリロナイトの底面反射は

表 3 モンモリロナイトのイオン交換後の (001) 面間隔

陽 イ オ ン 種	(001) 面間隔
Na (原モンモリロナイト)	12.3~12.8 Å
Ca	13.8~15.4 Å
Mg	14.2~15.3 Å
NH ₃	11.6~12.5 Å

低角度側へシフトすると同時にきわめてブロードになることが確認された。結果は表 3 のとおりである。

これらの結果を用いて石灰処理モンモリロナイトの底面反射を追跡することにより反応の進展を計る目安とした。但し厳密には水蒸気圧等の試験条件を一定にする等の実験上困難な要素が多くあくまで定性的な比較検討である。

4.4 粘土試料の締固め試験

一般の土においては石灰処理を施すことにより最適含水比 (O. M. C.) は増加し、 $r_{d \max}$ (最大乾燥密度) は減少し、また強度特性としては O. M. C. 付近で最大強度が得られるとされている。図 2, 3, 4 に示すように今回の実験でもそれを裏付ける締固め曲線が得られたが、モンモリロナイト・パイロフィライトについては石灰量が 10% 越えと O. M. C., $r_{d \max}$ とも

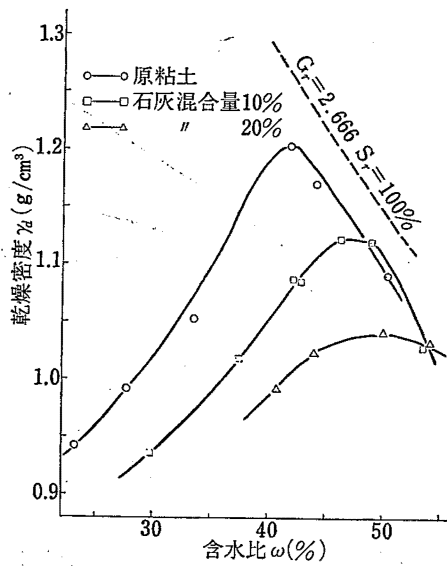


図2 カオリナイトの締固め特性

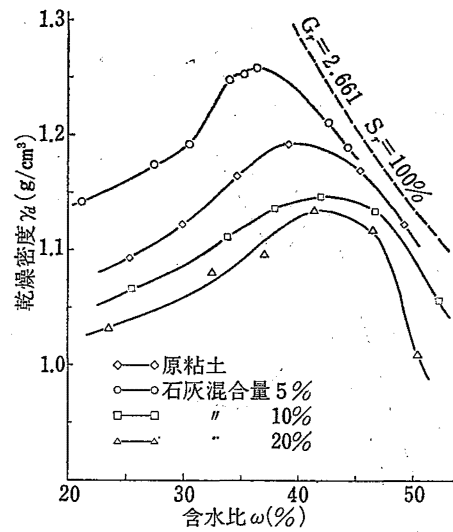


図4 パイロフィライトの締固め特性

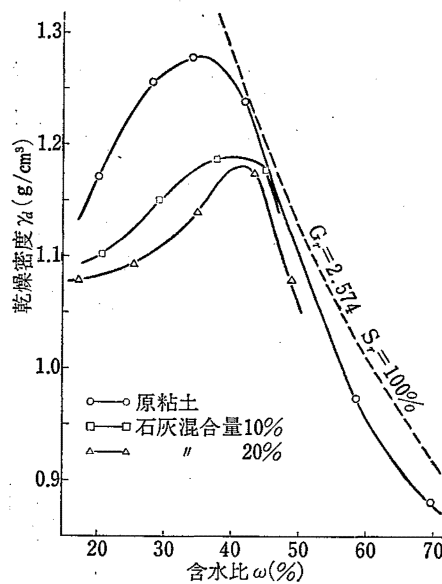


図3 モンモロロナイトの締固め特性

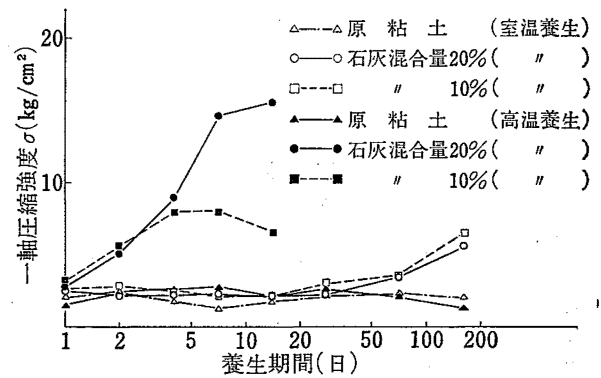


図5 養生期間による一軸圧縮強度の変化(カオリナイト)

にあまり大きな変動を示さなくなる傾向があること、またカオリナイト・パイロフィライトについては石灰量が多くなると締固め曲線が鈍化しすなわち O. M. C. 付近での γ_d に極端な差がみられなくなる傾向があることが各々窺えた。

4.5 一軸圧縮試験

4.5.1 養生期間に伴う圧縮強度の変化

石灰の混合により各粘土とも圧縮強度が増加し同時に圧縮歪量は減少する。図 5. 6. 7 に結果を示した。図

では縦軸に同一条件での試験の平均値をとってある。図から室温養生の場合はカオリナイトで 10～21 週、モンモロロナイトで 2～4 週、パイロフィライトで 4～10 週で強度の発現があることが認められる。また高温養生の場合ではいずれの粘土とも 2～4 日できわめて顕著な強度発現がみられその後は 1 週程度で横ばいの状態となる。

粘土種別では養生条件にかかわらずモンモロロナイトの発現強度が大きい。また同一条件での強度のバラツキも他の粘土に比較して大きかった。

また各粘土とも後述するように石灰混合量により発現する強度には差がみられるものの強度発現のパターンには大きな差異は認められない。

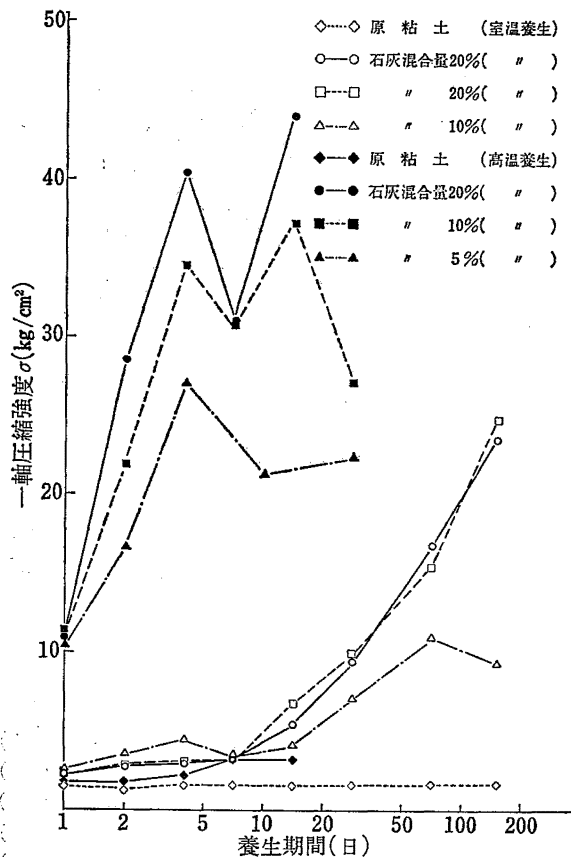


図 6 養生期間による一軸圧縮強度の変化 (モンモリロナイト)

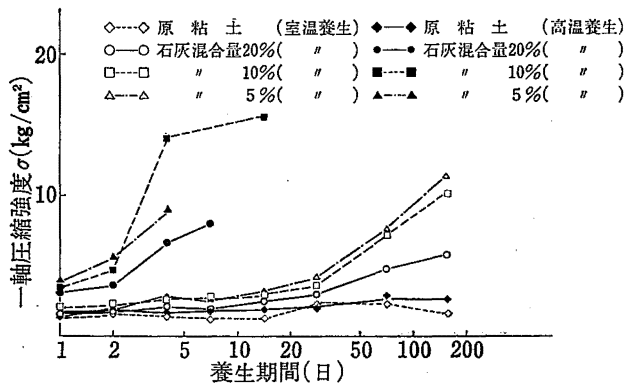


図 7 養生期間による一軸圧縮強度の変化 (パイロフィライト)

石灰混合に伴う強度発現は粘土のイオン交換・石灰保持反応による凝集化あるいは SiO_2 , Al_2O_3 等の溶出に伴う反応生成物等による団粒化等で説明がなされている^{1), 3), 4), 6)} がこれらの点についてはX線回折試験の結果を併せて後述する。

4.5.2 石灰混合量に伴う発現強度

全般的な傾向として、カオリナイト・モンモリロナイトについては石灰の混合量が大いほど強度発現効

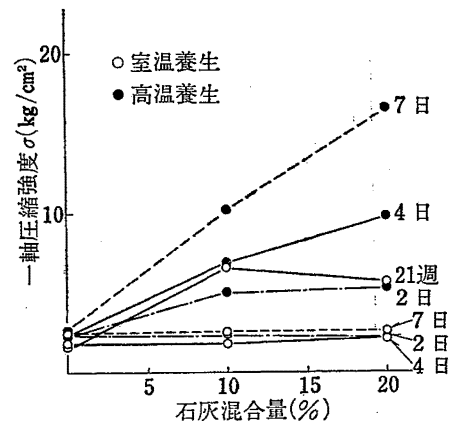


図 8 石灰混合量による一軸圧縮強度の変化 (カオリナイト)

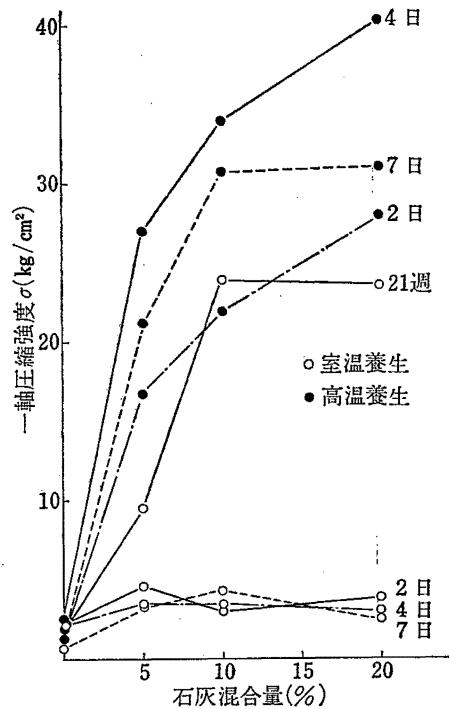


図 9 石灰混合量による一軸圧縮強度の変化 (モンモリロナイト)

果も大であるが、高温養生の試料についてみられるように石灰混合量が 10% を越えるとその効果は鈍化の傾向が窺える。またパイロフィライトについては石灰混合量が 5~10% で最も強度発現効果が大である。これらを図 8, 9, 10 に示した。

またいずれの粘土についても室温養生の場合では養生期間が 7 日程度までの短期間の場合は前述のような強度発現効果は認められず石灰混合量による差もほと

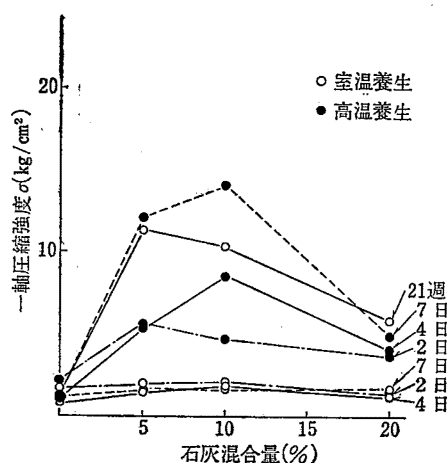


図 10 石灰混合量による一軸圧縮強度の変化 (パイロフィライト)

んど認められない。養生期間が長期にわたってはじめて強度発現が認められるが、図中の 21 週養生の場合にみられるように石灰混合量による差は短期高温養生の場合と同様のパターンを示す。

4.6 養生期間によるコンシステンシー等の変化

一軸圧縮試験後の供試体の一部を用いて試料のコンシステンシー・pH を求めた。結果はいずれの粘土についても同様でその概略は、pH については 12~13 の間で大きな変化はなく、コンシステンシーについては養生期間に伴って液性限界の低下・塑性限界の上昇が認められ塑性指数が減少する。これらの値は高温養生の場合は 4~7 日で室温養生の場合は 4~10 週ではほぼ一定値となり圧縮強度の変化と似かよった結果が得られた。

4.7 X線回折試験

4.7.1 石灰混合量によるX線回折パターンの検討

2 種以上の鉱物種の混合物を各鉱物種の X 線回折線の相対強度を用いて定量する方法がある。その方法により粘土に混合した石灰の回折線強度を基準とする物質の回折線の強度(注)と比較(以後単に「相対強度」と呼ぶ)する検量線を求めた。図 11 がそれである。

石灰の回折線の相対強度は石灰の混合量とは比例の関係にあることが確認され、X 線回折試験により粘土中の石灰の存在量を知ることが可能と判断される。ま

(注) ここでは、回折図形上に現われる回折線の面積をもって回折強度とした。

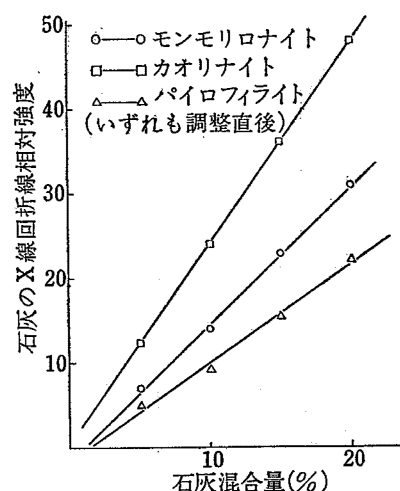


図 11 粘土中に混合した石灰量とその X 線回折線相対強度

た図からは X 線による石灰の検出限界が一番条件の悪いパイロフィライトの場合で 1.5% 混合量であることも判明した。

但し図では、モンモリロナイト・パイロフィライトの場合は不純物として混入する石英の (101) 面の回折線 Q_{101} (以後本報告では誤解のない範囲で鉱物名を下記の略記号で表示し結晶面の指数を数字でその記号に添えて示す。K: カオリナイト, M: モンモリロナイト, P: パイロフィライト, Q: 石英, C: $\text{Ca}(\text{OH})_2$, つまり Q_{101} は石英の (101) 面の回折線を表わす)。を、またカオリナイトの場合はカオリナイト (001) 面の回折線 K_{001} を各々基準にとって、石灰の (101) 面の回折線 C_{101} の相対強度についてのデータを示してある。

4.7.2 養生期間の変化に伴う X 線回折パターンの変化

a) カオリナイト カオリナイトの石灰処理による X 線回折パターンの一例を図 12, 13 に示した。これらを見ると高温養生の場合は養生期間 2~4 日で石灰の回折線がほとんど認められなくなり前後して反応生成物の回折線(図中では矢印で表示)が出現する。この反応生成物は 17.2° 付近その他の回折線より同定されるアルミン酸石灰水和物の一種 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ であると考えられる。

室温養生の場合ではこれらの反応生成物の回折線は養生期間が長期にわたっても認められないが石灰の回折線は明らかに弱小化する。

これらの傾向は石灰混合量が異なっても同様に認め

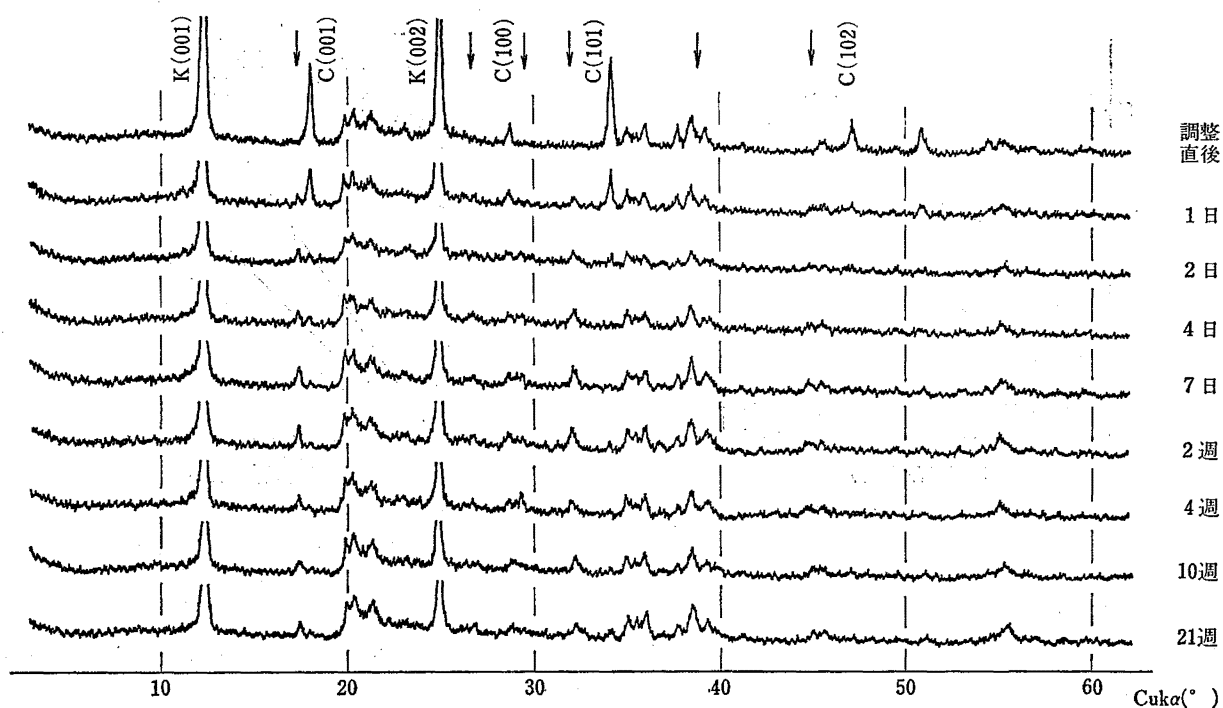


図 12 石灰処理によるX線回折パターンの変化 (カオリナイト, 石灰量 20%, 高温養生)

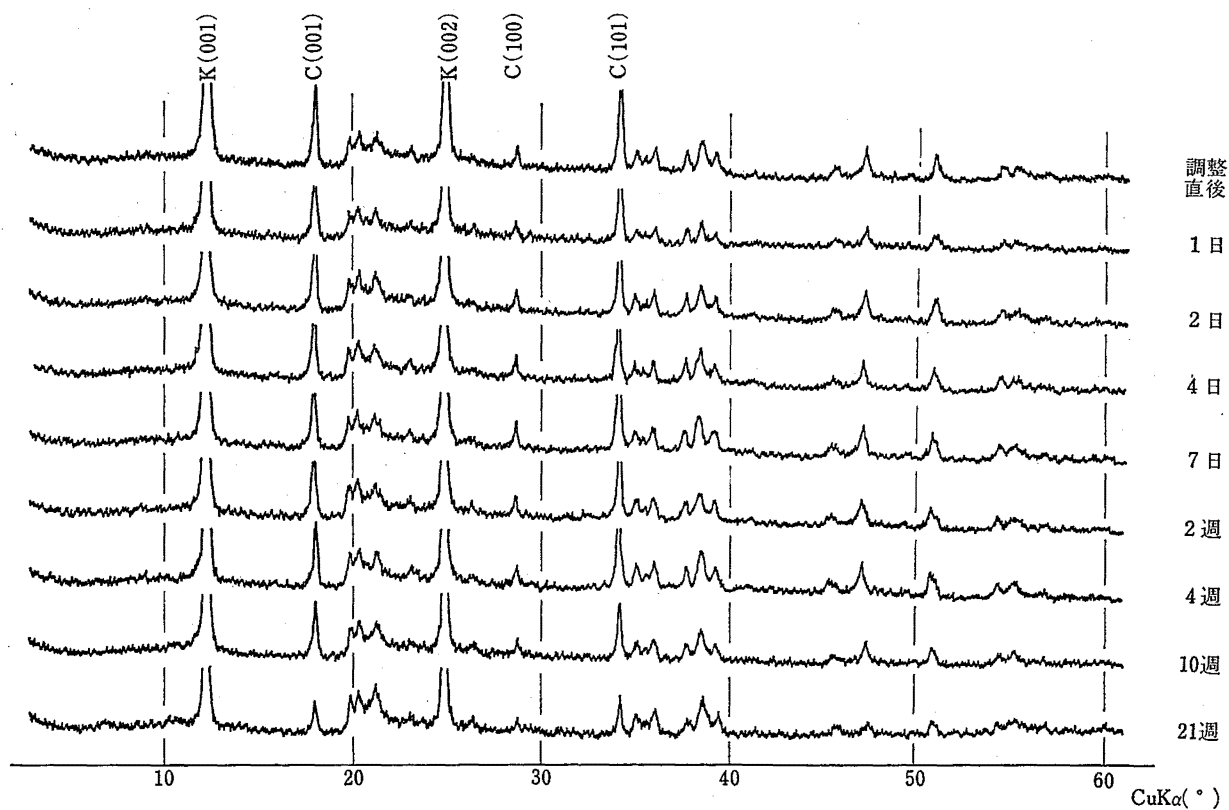


図 13 石灰処理によるX線回折パターンの変化 (カオリナイト, 石灰量 20%, 室温養生)

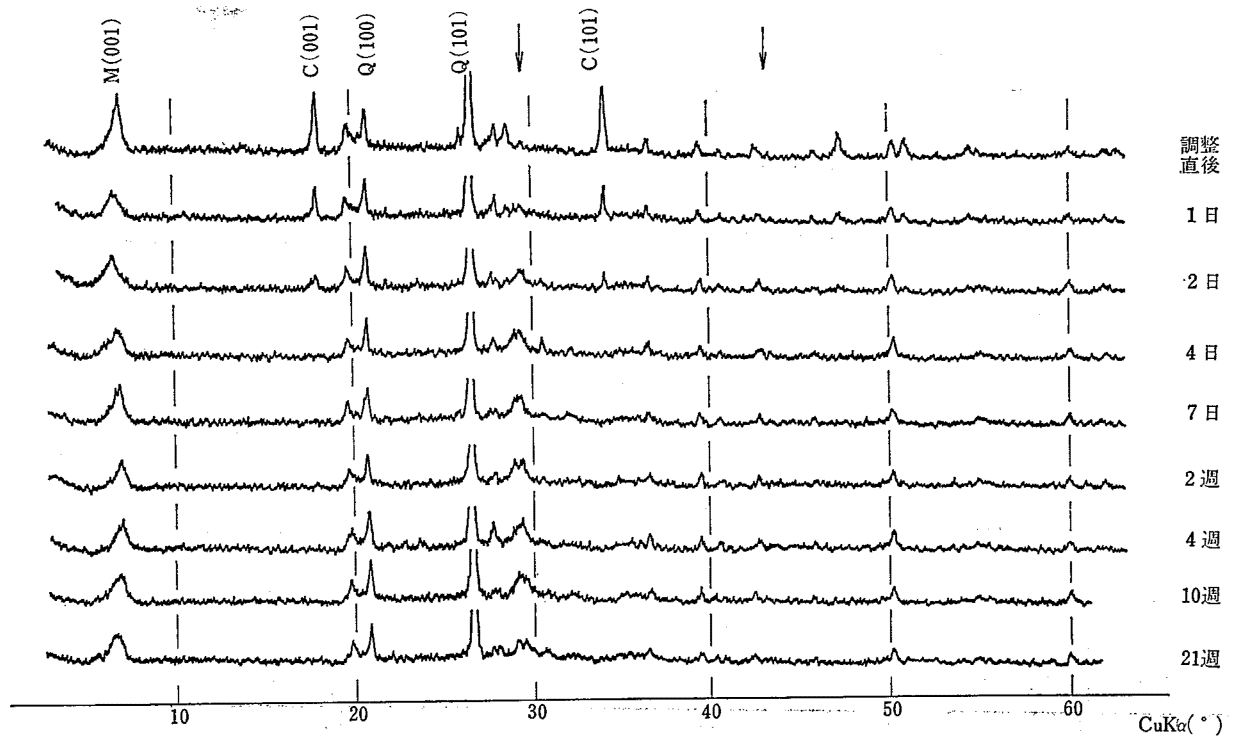


図 14 石灰処理によるX線回折パターンの変化 (モンモリロナイト, 石灰量 20%, 高温養生)

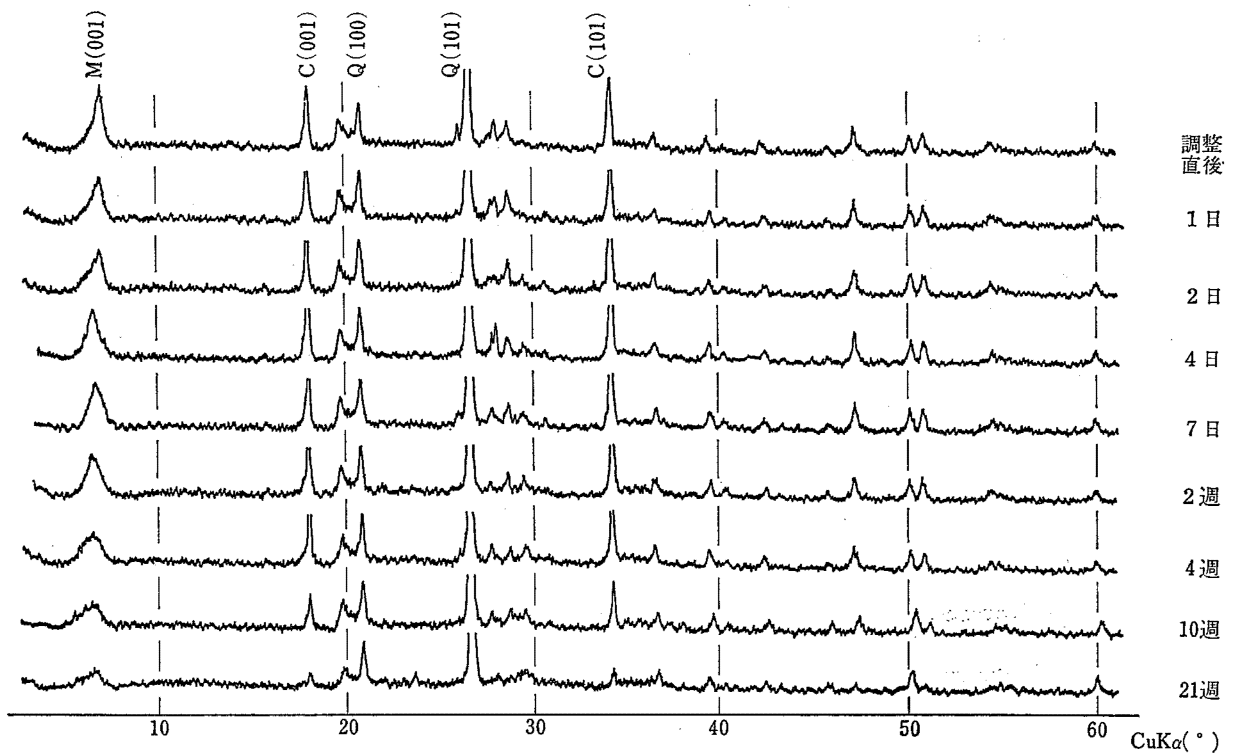


図 15 石灰処理によるX線回折パターンの変化 (モンモリロナイト, 石灰量 20%, 室温養生)

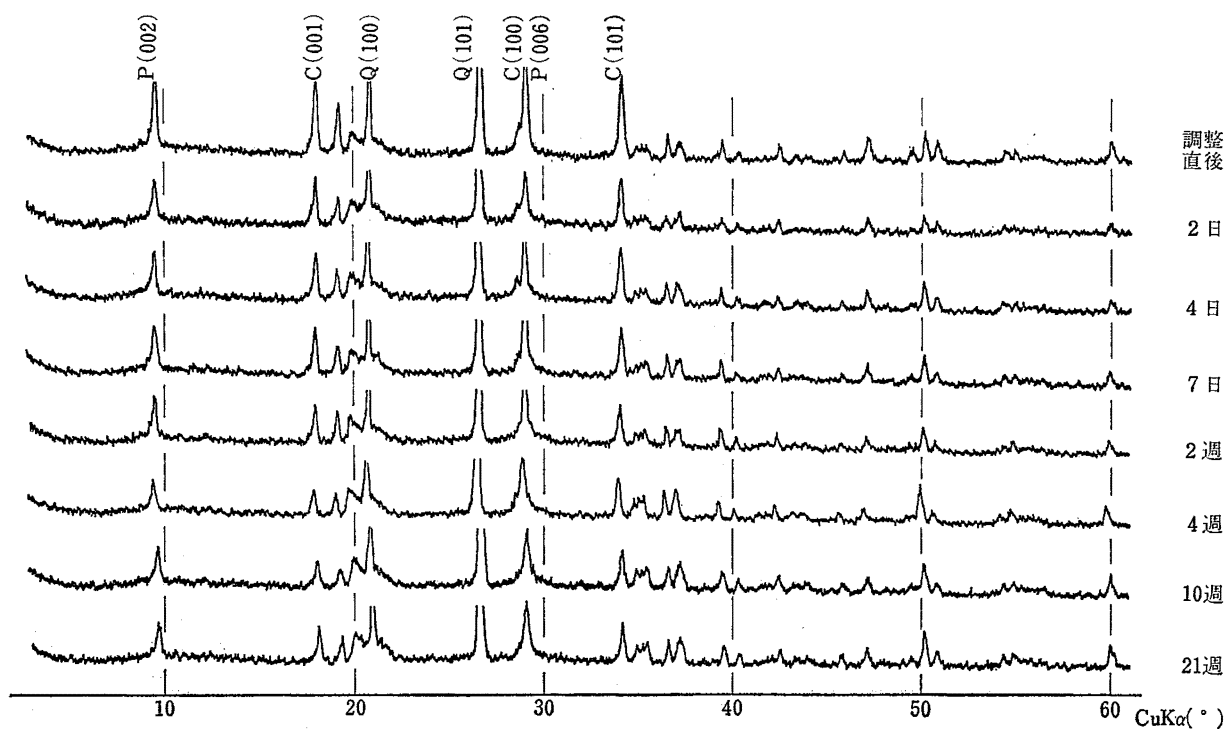


図 16 石灰処理によるX線回折パターンの変化 (パイロフィライト
石灰量 20%, 高温養生)

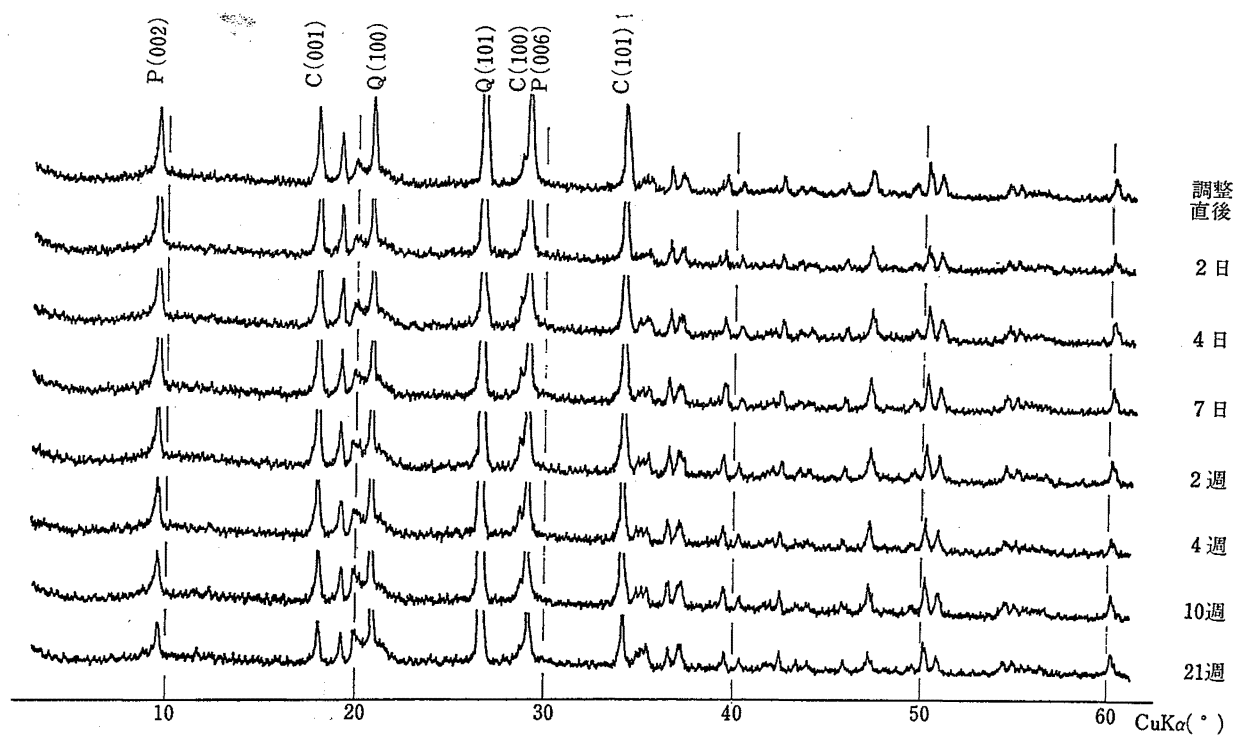


図 17 石灰処理によるX線回折パターンの変化 (パイロフィライト,
石灰量 20%, , 室温養生)

られる。

b) モンモロロナイト モンモロロナイトでは高温養生の場合、石灰の回折線は2～4日で消滅し前後して29.4°付近にケイ酸石灰水和物のブロードな回折線がかなり明瞭に現われる。この回折線は養生期間と共に成長する。またモンモロロナイトの底面反射は図14の例からもわかるとおり養生期間とともに鈍化し強度も小さくなる。しかし底面反射のシフト（層間距離の変化）は明瞭ではない。

一方室温養生の場合は石灰の回折線の弱小化は図15の例からもわかるとおり2～4週あたりから顕著になる。同時に底面反射は著しくブロードとなり強度も低下し、また養生期間に伴って底面反射の低角度側のシフトも認められCaによるイオン交換の進展を示している。ケイ酸石灰水和物の生成は高温養生の場合と比較すると強力ではないがやはり明瞭に認めることができる。

c) パイロフィライト パイロフィライトの場合は図16, 17の例から判明するようにカオリナイト・モンモロロナイトでみられるような反応生成物は少なくともX線的には認められない。しかし石灰の回折線の相対強度は養生条件にかかわらず養生期間とともに漸減する。これは図20の例でも明らかである。

以上得られたパターンから養生期間にしたがって各鉱物の回折線の相対強度の消長を示す例を図18, 19, 20に示した。

以上のようなX線回折パターンの検討から粘土中に混合された石灰は、カオリナイト・モンモロロナイトの高温養生の例に明らかなように反応生成物の生成のために消費される以外に、モンモロロナイトの室温養生の例に明らかなようにイオン交換等に対しても消費されている。またパイロフィライト及びカオリナイトの室温養生の場合のように顕著な反応生成物の生成あるいはイオン交換の出現が認められない場合でも石灰

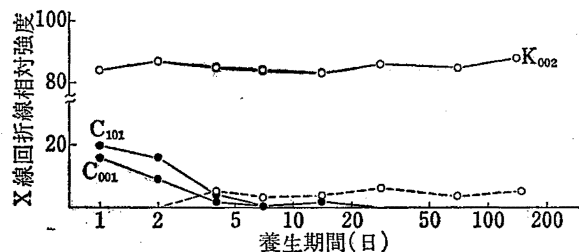


図18 各回折線の相対強度の変化
(カオリナイト, 石灰量 10%, 高温養生)

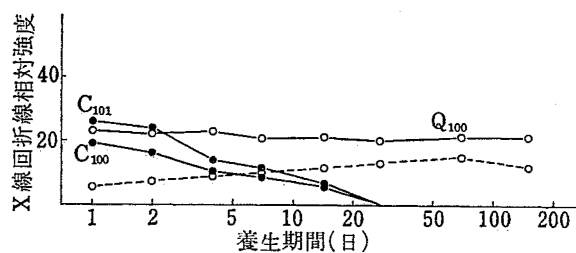


図19 各回折線の相対強度の変化
(モンモロロナイト, 石灰量 20%, 高温養生)

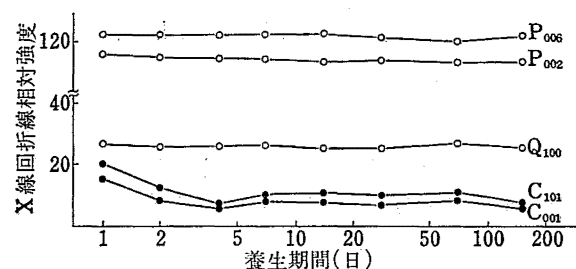


図20 各回折線の相対強度の変化
(パイロフィライト, 石灰量 10%, 室温養生)

の消費は進展し強度の発現も見られる。したがってこれらは粘土表面にCaイオンが吸着される石灰保持反応の形で石灰が消費されていると考えられる。もちろん石灰の消費形式の各々が単独で起るわけではないと考えられるが実験結果からは粘土種・養生条件等がそれらの進展に大きな比重を占めることを示唆している。次に以上の事を包含した形で粘土中の総石灰消費量について検討する。

4.7.3 養生期間による石灰の消費量

粘土中に混合した石灰は養生期間とともにその回折

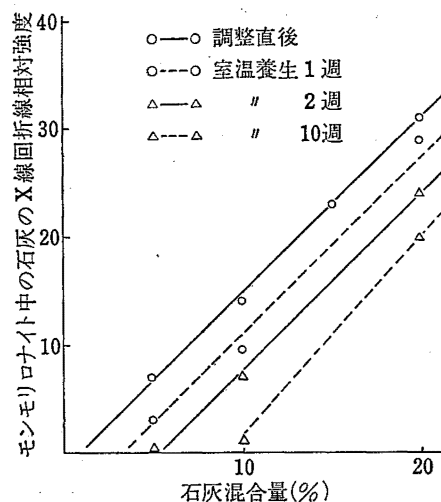


図21 モンモロロナイト中の石灰の消費

線の弱小化にみられるように分解消費されるが、この現象は当初の石灰混合量とはほぼ無関係に進展する。これをX線回折線の相対強度で整理した例を図 21 に示す。図はモンモリロナイトの室温養生の場合であるが、他の粘土についても養生条件にかかわらず同様の結果が得られる。図では養生期間をパラメータとして石灰の(001)の回折線 C_{001} の相対強度についてプロットしたものであるが他の回折線についても全く同様である。

図が示すように粘土中に混合した石灰量とそのX線回折線相対強度との関係を示す直線は養生期間とともに図の下側へほぼ平行移動する。このことは粘土中で消費される石灰量が当初混合された石灰量とは無関係にはほぼ一定の割合で消費されてゆくことを示す。その消費速度は養生温度により大きな影響を受けるものの全体的な傾向には変わりがない。

4.8 石灰の消長と一軸圧縮強度との関係

粘土中に混合された石灰が粘土種や養生条件による差異はあるものの養生期間に伴って分解が進みイオン交換・吸着あるいは反応生成物の生成のため消費され粘土粒子の結合を進展させ強度を発現するが、各々の現象がどの程度それに寄与するかについてはさらに検討が必要である。

しかし発現した強度の目安を知るためには、粘土中に残存する石灰量という形で捕えると実用的にも応用可能な形で整理される。図 22~25 にその例を示した。

図は、横軸に粘土中の石灰のX線回折線相対強度、縦軸に一軸圧縮強度をとって養生期間毎の両者の関係位置をプロットしたものである。両者の関係はほぼ直

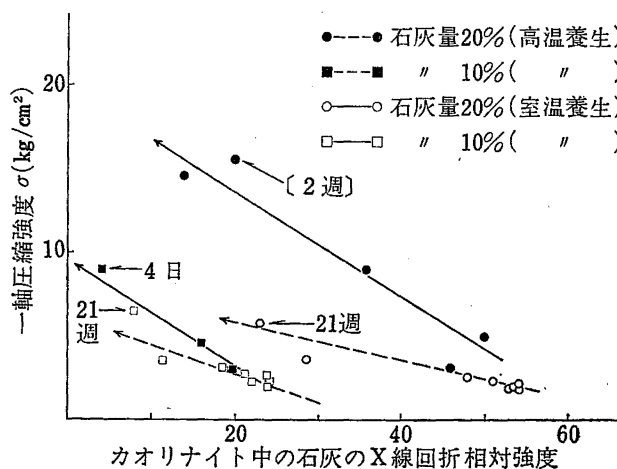


図 22 カオリナイト中の石灰の消長と圧縮強度

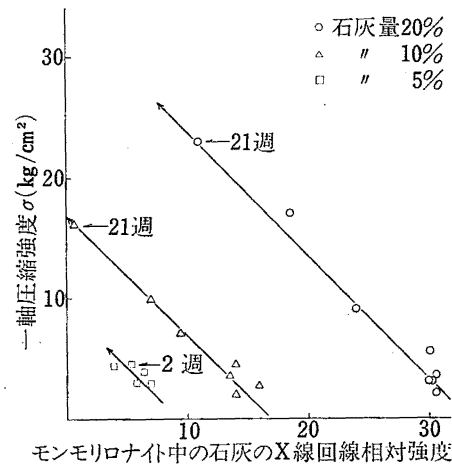


図 23 モンモリロナイト中の石灰の消長と圧縮強度 (室温養生)

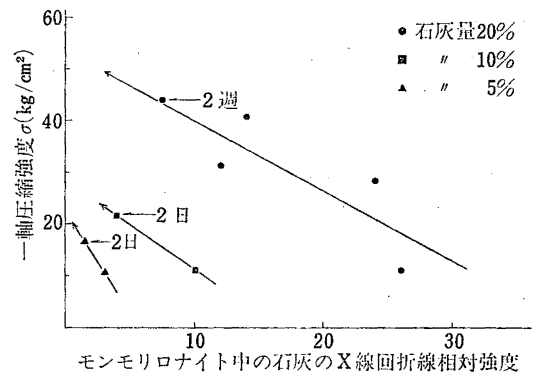


図 24 モンモリロナイト中の石灰の消長と圧縮強度 (高温養生)

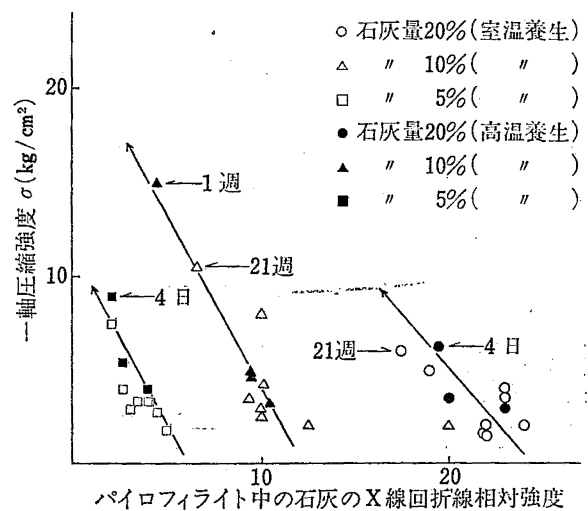


図 25 パイロフィライト中の石灰の消長と圧縮強度

線関係とみなされ当初の石灰混合量により直線の位置が定まり、石灰の混合量の差異は直線の位置の平行移動で表わされる。カオリナイト・モンモリロナイトについては養生温度の条件により直線の傾きに差があるが、パイロフィライトについては養生条件にかかわらず石灰混合量が同一であれば同一線上にプロットされる。モンモリロナイトの高温養生の場合には石灰量により直線の傾きには差もみられる。これらはカオリナイト・モンモリロナイト等では、反応生成物の生成など石灰の消費形式に養生温度条件等が大きく作用するためと考えられる。

図上での両者の関係位置は、石灰混合量により定まった直線上を養生期間にしたがって多少の前後はみられるが矢印の方向へ移動する。その速度は養生温度条件により大きく異なるが、図中には今回の実験で最終的に得られているプロットについてその養生期間を示した。

粘土種・養生条件等を考慮した上でこのような図を作成すると、最終的な圧縮強度あるいはそれを得るために必要な石灰量・養生期間などをおおよそ知ることが可能である。細部については未だ検討の余地はあるが石灰による土質改良等に当たっての品質管理のひとつの手法としての可能性を示唆している。

5. あ と が き

以上、三種の粘土鉱物を主体とする粘土に石灰処理を施した場合のX線的な変化と一軸圧縮強度の変化を中心に追跡した結果を述べた。その主な結果は次のようなものである。

i) 石灰の混合により各粘土とも一軸圧縮強度の増加をみる。カオリナイト・モンモリロナイトについては石灰混合量が大いほどその効果が高いが、パイロフィライトについては5~10%程度で最も効果が大い(図5~10)。

ii) 強度の発現がみられる期間は高温養生の場合はきわめて短期でいずれの粘土でも2~4日である。室温養生の場合はカオリナイトで10~21週、モンモリロナイトでは2~4週、パイロフィライトで4~10週程度である(図5~10)。

iii) 粘土中に混合された石灰量及びその消長をX線回折試験により石灰のX線回折線相対強度を用いて知ることが可能でありその検出限界は今回の実験では

1.5%であった(図11)。

iv) カオリナイトの石灰処理では高温養生の場合、石灰の消滅とアルミン酸石灰水和物・ケイ酸石灰水和物の反応生成物の出現が認められ、室温養生の場合は養生期間に伴う石灰の漸減がみられる(図12, 13, 18)。

v) モンモリロナイトの場合は、ケイ酸石灰水和物の反応生成物が出現する。またCaによるイオン交換が底面反射から推定できる。石灰は養生期間に伴って消滅あるいは漸減する(図14, 15, 19)。

vi) パイロフィライトの場合は反応生成物は認められないが石灰は養生期間に伴ない漸減する(図16, 17, 20)。

vii) 粘土中に混合された石灰は養生期間とともに消費されるがその割合は当初混合される石灰量とは関係なくほぼ一定である(図21)。

viii) 粘土中に残存する石灰量をX線回折線相対強度として捕えると一軸圧縮強度との間にはほぼ直線(負の比例)の関係がある。その関係位置は当初混合する石灰量により定まる(図22~25)。

ix) 前項の関係図は、粘土種別に石灰混合により得られる最終的な圧縮強度あるいはそれらを得るために必要な石灰量・養生期間などの推定の可能性を示唆し石灰処理土の品質管理等への応用の可能性を示している。

自然地盤に対する石灰処理をはじめとする各種の安定処理についての系統的・定量的な検討はこれからも積重ねが必要であるが、特に化学的側面からは自然地盤中で大きな役割を演じる粘土鉱物等についての基礎的な検討が望まれる。

未筆ながら粘土原料の電子顕微鏡観察にあって当所橋内良雄氏にまた諸実験及びデータ整理にあたって伊藤幹君(当時日本大学理工学部)の御助力を得たことを付記致します。

参 考 文 献

- 1) 有泉他, 土木研究所報告, No. 122 (1964) など
- 2) 松尾他, 土木学会論文報告集, No. 193 (1971)
- 3) ORMSBY, W. C. et al, Public Road, Vol. 137, No. 4 (1973) など
- 4) DAVIDSON, D. T. et al, Bull. HRB, No. 349 (1962)

- 5) CROFT, J. B., Géotechnique, Vol.17, No. 2 (1967)
- 6) 浅川他, 土木学会第 30 回年次学術講演会講演要旨Ⅱ-227, Ⅲ-228 (1975) など
- 7) 松尾他, 土質工学会第回研究発表会講演要旨 187 (1974)
- 8) 須藤俊男, 粘土鉱物学, 岩波書店 (1974)
- 9) 土質工学会編, 土質試験法 (改訂版), 土質工学会 (1969)
- 10) 日本粘土学会編, 粘土ハンドブック, 技報堂, (1967)

(昭 53.3.31 受付)

産業安全研究所技術資料

RIIS-TN-77-10

昭和 53 年 5 月 30 日 発行

発行所 労働省産業安全研究所

東京都港区芝5丁目35番1号

電話 (03) 453 - 8 4 4 1 (代)

印刷所 新日本印刷株式会社

UDC 548.734 : 549.6 : 624.131 : 666.953

粘土鉱物の石灰処理

前 郁夫・鈴木芳美

産業安全研究所技術資料

RIIS-TN-77-10, 1~16(1977)

カオリナイト・モンモリロナイト・パイロフィライトを主体とする各粘土を対象として石灰処理を施した場合の基礎的データを得るため、化学的変化を主にX線回折試験により、また処理効果を締固め供試体の一軸圧縮強度測定を中心に、養生期間・養生温度・石灰混合量等をパラメータとして追跡検討した。

粘土中に残存する石灰量をX線回折線相対強度として捕えると一軸圧縮強度との間にはほぼ反比例の関係が認められ、石灰処理土のX線による品質管理への応用の可能性を示した。
(図 25, 表 3, 参 10)

UDC 548.734 : 549.6 : 624.131 : 669.953

Lime treatment of clay minerals

I. Mae & Y. Suzuki

**Technical Note of the Research Institute of Industrial Safety RIIS-TN-77-10,
1-16 (1977)**

The fundamental data about lime treatment of clay minerals (kaolinite, montmorillonite and pyrophyllite) were studied by X-ray diffraction analysis and by unconfined compressive strength of compacted specimens.

The relations between the changes of unconfined compressive strength and the changes of relative intensity of diffracted X-ray for lime which is rested in lime-clay mixtures were indicated as inversely straight lines.

This indicates the possibility of the quality control at the lime-stabilization by the use of X-ray.

(25 figures, 3 tables, 10 references)