

X線および電子顕微鏡による石灰安定処理土の構造的研究

THE FABRIC STUDY OF LIME-STABILIZED SOILS BY X-RAY
AND ELECTRON MICROSCOPY

松尾新一郎*・宋永焜**
By Shinichiro Matsuo and Yung-Kung Sung

1. はしがき

この研究は、土質安定の立場から、石灰処理土の締固めマトリックスの構造的変化、締固め土を構成する一次鉱物、二次鉱物の形態的変化、および反応生成物と間げきの発生、成長、消失などの情況的変化をX線および電子顕微鏡を用いて研究したものである。電子顕微鏡を用いた土一水一石灰システムに対する過去の本邦内外における研究^{1), 2), 3)}では、その多くが過剰水分状態の溶液分散試料を用いて行なってきた。このようなものは、過剰水分とある一定条件（溶液濃度、pH等）のもとで個々の粒子と土との反応を純理学的に研究することが目的であった。土質工学の立場から、このような研究をみると、それはあまりに実情にそぐわない感がある。工学的目的のための締固めは、常に有限水分のもとで行なわれ、反応もその中で行なわれる。たとえば、道路路盤施工の場合がその良い例である。また、石灰安定処理土の強度の一要因ともなる。陽イオン交換、綿毛化構造、および高密度化作用は、過剰溶液下の分散状態とは明らかに異なる。石灰処理土の有限水分下における締固め土の構造的研究の必要な理由がここにある。

一方、外国でも、近来このような立場から、二、三の研究が行なわれてきた。Mitchellら⁴⁾によるソイルセメントの研究、Ormsbyら⁵⁾、あるいはWilloughbyら⁶⁾によるソイルライムの研究がそれである。この中でOrmsbyらおよびWilloughbyらの研究は、粘性土だけを対象としたものであり、Mitchellらによる研究は、シルト、砂質粒子などが締固め土の中に含まれているにもかかわらず、その変化などがまったく解析されていない。この研究では、反応性良好の粘性土と考えられ

るベントナイトのほかに、主としてマサ土を用いて行なった。反応生成物や、マトリックスの変化のほかに締固め土を構成している長石、石英などの一次鉱物の変化にも留意して考察した。

2. 実験試料と検鏡試料の作製法

実験に用いた試料は、比えい山のマサ土と市販のベントナイトであり、その粒径加積曲線と、物理化学的性質をおのおの図-1および表-1に示した。また、マサ土の含有一次鉱物のX線回折図を図-2に示した。電顕試料用の締固めは、ハーバード締固め試験機により40#×

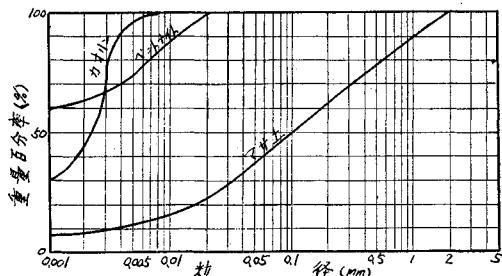


図-1 原土の粒径加積曲線

表-1 原土の物理化学的性質

項目	試料	マサ土	ベントナイト	カオリン
比重		2.677	2.581	2.722
液性限界		47.37	323.2	50.2
塑性限界		28.33	44.7	29.1
塑性指数		19.04	278.5	21.1
砂分(%)		55	0	0
シルト分(%)		33	25.0	5.0
粘土分(%)		12	75.0	95.0
三角座標による分類		砂質ローム	粘土	粘土
K ⁺		0.17	4.0	0.16
塩基交換性Na ⁺		0.85	77.40	0.19
イオンCa ⁺⁺		0.35	3.65	4.71
Mg ⁺⁺		0.23	3.95	0.18
pH		8.95	9.32	3.30
最適含水比(%)		16	35.7	23.3

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 工修 京都大学大学院 土木工学専攻博士課程
学生

3層×25回の締固めエネルギーで行ない、工学的性質試験用の供試体締固めは、突固めによる締固め方法で行った。消石灰添加率は10%，含水量維持のため、工学的試験のための供試体はパラフィンでシールして養生し

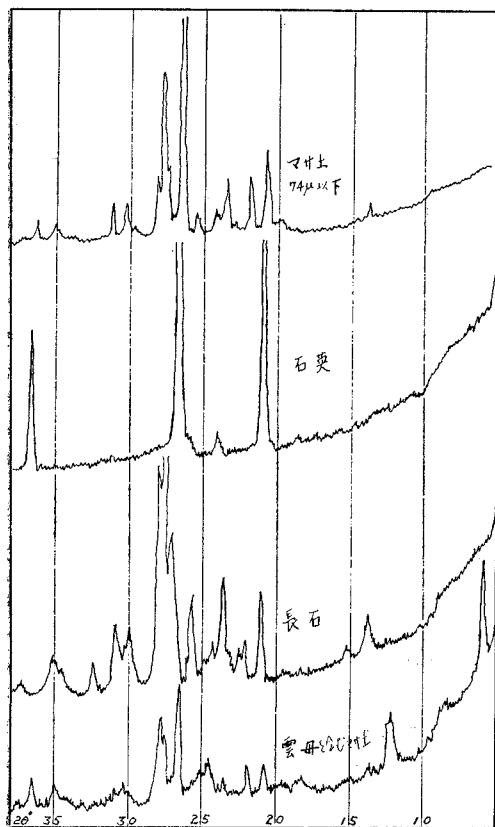


図-2 マサ土と含有鉱物のX線回折図

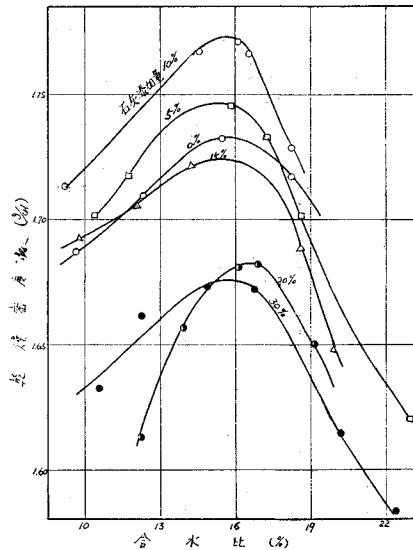


図-3 マサ石灰処理土の突固め試験

炭酸化作用と関連する供試体は空中養生を行なった。石灰添加率10%の決定は、図-3のような締固め結果によるものである。電顕観察試料の作製法は、おのおのポリスチレン法(締固め土断面レプリカ)、およびアセチルセルロースフィルム(一次鉱物表面構造 Replica)による2段レプリカ法である。その詳細は著者らの別論文¹⁾に詳述してあるのでここでは省略する。この場合一種の試料に対しては、常に4つ以上の検鏡試料膜について観察した。使用した器械は、日立HS-7S型、最大電圧50kVである。

3. 石灰安定処理土のメカニズムについて

現今知られている範囲内で石灰安定処理土の強度発生のメカニズムについて簡単に述べてみると、表-2のようになる。このうち、砂質土にもっとも影響あるものと、副次的なものに分けると、次のようになる。

砂質土への主要作用

- (1) 炭酸化作用
- (2) 被覆最適量
- (3) 高密度化

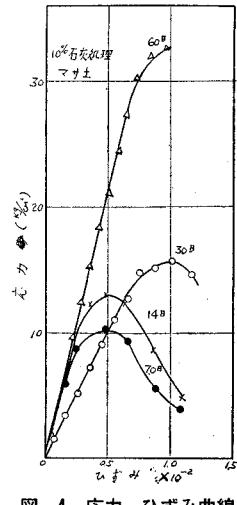


図-4 応力-ひずみ曲線

表-2 強度発生のメカニズム

強度発生の起源	賛成論の根拠	否定論の根拠	註
イオン交換作用	Ca粘土のせん断抵抗大	Na粘土でも石灰安定に良好な応答あり、Ca粘土強度不足、完全なイオン交換不可能	
綿毛凝集作用	粘土に対する多価カチオン、および電解質濃度の増加による凝集作用	多くの凝集材、安定処理効果なし、分散に抵抗するだけの力である	凝集材：醜類、ケトン、アルコール等
炭酸作用	石灰処理土の炭酸作用、乾燥地帯、天然炭酸化物の粘着力	石灰処理土の空気隔離、または、炭酸化作用の除去、強度なお発生	
含有シリカ質の粘着力	Siの溶出(11>pH>3)結果による粘着力、珪酸化物の注入によるゲル化	ゲル結晶速度おそし、水溶液状態ゲル機械強度小	ボゾラン反応、ゲル/間けき概念
含有鉄質またはアルミニナ質の粘着力	アルカリ処理土のAl-Si相存在、天然Laterites化、アルミニ酸化物の注入ゲル化	安定作用消失することなく、Fe分除去可能	
ミクロ的摩擦力	繊維状生成物などによる鉄筋作用	結晶おそく、その作用確かでない	
高密度化	水和物(セメントゲル等)の膨張による間けき填充	粘土鉱物にbondをあたえなければ破裂の防止不十分	
被覆最適量	最適量をこしても強度の増加あまりなし	安定材の量を変化させるとLL, PL, 強度値が違ってくる	

- 砂質土への副次的作用
- (1) イオン交換
 - (2) 繊維凝集作用
 - (3) シルカ質、アルミナ質、鉄質の粘着力
 - (4) ミクロ的摩擦力

上記のように、砂質土への主要作用は主として、短期作用であり、また物理作用でもある。しかし、それだからといって砂質土でも物理化学的な長期作用をぜんぜん無視できるわけでもない。普通の他の安定材が 28 日くらいで最大強度に達しているにもかかわらず、石灰処理砂質土の長期反応の影響は、図-4 から理解することができる。この図から、一般安定材の最終強度に達する日数(28 日)と 60 日とでは大きな強度の差がある。石灰処理土の作用は、一般にソイルセメントに比較して長期にわたるものであり、このことは石灰処理土の欠点である。

以下、マサ石灰安定処理土のメカニズムについて、実験結果と対照しつつ説明する。

(1) 炭酸化作用

炭酸作用による粘結効果は、乾燥地帯における天然炭酸塩の粘着力からも知り得る。マサのような砂質土においては、むしろこのような石灰と土粒子との短期反応による作用が強度の増加に主要な役割を演ずるものと思われる。本研究では、炭酸化作用による重量増加率

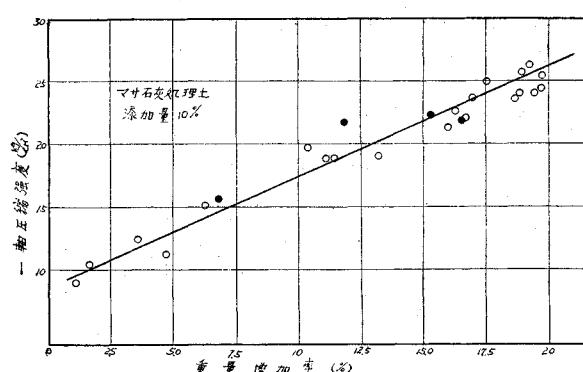


図-5 炭酸作用による重量増加率と一軸圧縮強度の関係

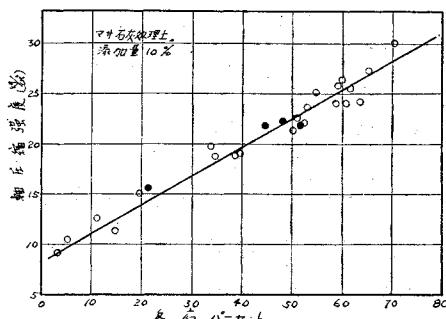


図-6 反応パーセントと一軸圧縮強度

(図-5) と反応パーセント(図-6)、および X 線回折による炭酸作用の変化と強度の変化について(図-7) 実験した。図-5 における重量増加率と反応パーセントは次のように定義した。

作成時の供試体乾燥重量 W_0 は

$$W_0 = \frac{W_1}{\left(1 + \frac{w}{100}\right)} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

W_1 : 作成時の供試体重量

w : 作成時の供試体含水比

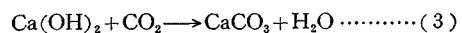
供試体養生後、1 日炉乾燥し、その重量 W_2 を求めると、重量増加分 $W_2 - W_0$ が求められる。ゆえに、重量増加率 δ_W は次式より求まる。

$$\delta_W = \frac{W_2 - W_0}{W_0} \times 100 \quad \dots \dots \dots (2)$$

この式(2)の関係を表わしたのが図-5 である。重量増加率の増加とともに強度も直線的に増加しており、炭酸作用による硬化現象と重量増加率が密接な関係にあることがわかる。

砂質土の硬化反応が主として、炭酸作用によるものであることは、図-7 の X 線回折図でわかるように、養生日数の増加とともに $\text{Ca}(\text{OH})_2$ のピークの漸減と、それとは反対に CaCO_3 のピークの増加、強度 q_u の増加がある。また、炭酸化作用が砂質土の反応硬化の主要原因であり、重量増加率から反応パーセントなる語を定義してさらに詳細に実験してみると、図-6 のようになる。反応パーセントと q_u は直線関係にあることがわかる。この場合、反応パーセントは次のように定義される。

消石灰の炭酸化作用は次式で表わされる。



分子量 74.1 44 100.1 18

ゆえに、一モル当たり、 $100.1 - 74.1 = 26 \text{ g}$ の重量増加がある。そこで締固め時における供試体の消石灰の重量 W を求めておくと、これがすべて炭酸カルシウムに変化した場合、 $4 W$ の重量増加がある。

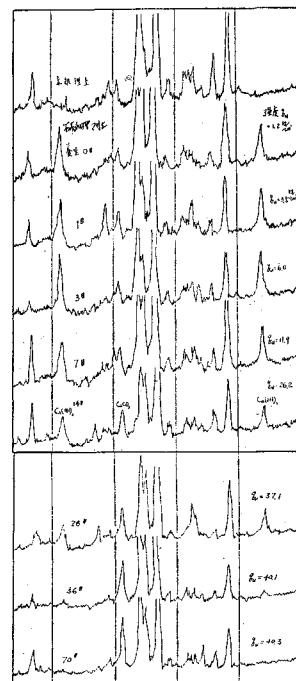


図-7 炭酸作用による強度の増加

次に、ある日数だけ養生した供試体を炉乾燥して、その重量 W_2 を求め、締固め直後の炉乾燥重量を W_0 とすると、重量増加分は $W_2 - W_0$ になり、反応パーセント P は次のように表わさる。

式(5)の結果が図-6であり、この図はあくまで重量増加や強度の増加の主原因が炭酸作用であるという仮定に基づくものであることはいうまでもない。この直線関係は、10%以外の添加量に対しても同様である。もし、この仮定が正しくなければ、反応パーセントと強度の関係をプロットしても図-6のように直線的にならないであろう。それゆえ、少なくとも、砂質土においては石灰硬化反応の強度に影響をおよぼすメカニズムとしては、炭酸作用が主要原因と考えられる。また、後述の電顕写真が示すように、同一養生日数でも反応の程度が異なり、実験誤差が入ったりするが、すべての供試体について、上記の誤差が入る可能性をもっており、数多くの点と添加量に対してプロットしてもその結果が図-6のように直線的に比例していることから考えると、炭酸作用が主原因であることがいえる。

(2) 被覆最適量⁶⁾

被覆最適量とは、石灰と土との反応の結果による非晶質ゲル状物質が砂質土の表面、または粘土の各構造単位をおおう最適量のことである。不飽和土では、砂質土、粘性土のいかんを問わず、 Ca^{++} イオンの移動がおそいのでイオン交換作用はあまり問題にならず、むしろ炭酸化作用のほかに、このような石灰添加後に生成される非晶質ゲルの被覆が強度の発生の上にも、また、X線回折による同定の上にも重大問題となることは、Willoughbyら⁶によっても指摘されている。Eades ら⁸は石灰処理土のX線回折のピークの低下をすべて、 Ca(OH)_2 の粘土鉱物に対する結晶の侵食と崩壊によるものとしているが、必ずしもこれによらないようである。たとえば、過量の添加材を入れると、非結晶物の妨害による影響をうけ、ピークが減少する。ゆえに石灰安定処理の場合、ピークの低下には添加直後に形成される非晶質物質の妨害による部分も相当に含まれていると考えられる⁶ので、試料に塩酸処理を施して、被覆ゲル状物質を洗い流し、養生1週間後のピークの鮮明さと反応生成物を比較したのが図-8である。この図から、次のことがわかる。

① 塩酸処理をしない石灰安定処理土は原土に比較して、ピークが普遍的に低下している。これは非晶質ゲルの被覆を証明するものである。

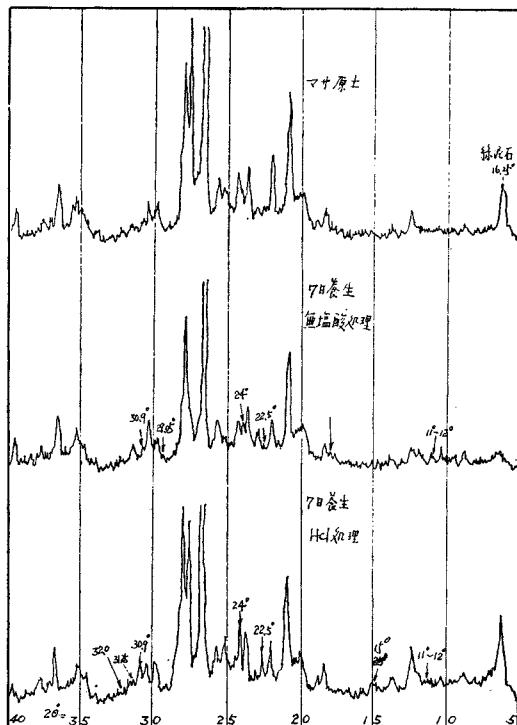


図-8 塩酸処理による反応生成物の判定

② 塩酸処理によって非晶質ゲルの被覆物が除去されると、新しいピークが表われたり ($11\sim12^\circ$, 22.5° , 24° , 30.9°) ピークが一層シャープになったりしている。そのほかの反応生成物は電顕写真でさらに検討する。

(3) 高密度化

石灰処理土は、その長期反応がソイルセメントにくら

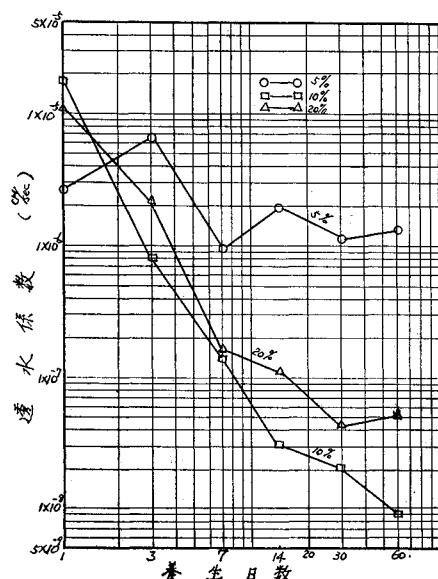


図-9 養生日数による透水係数の変化

べて締固め土の強度や透水性に重要な役割りを演ずるものである。初期に生成されたゲル物質や長期養生後に生成される反応生成物は、砂質土の表面やその粒子間の空げきを充てんする。そのため、粒子間に結合力があたえられ、ひびわれに対する抵抗力が増進し、マス全体が高密度化されていく。粘性土では、粘土クラスター（clay cluster）またはドメイン（Domain）間を結合させ、空げきを減少させる。このことから石灰処理土の透水性は長期にわたって減少し続けていくことが考えられ、この傾向を示したのが図-9である。この図では、最大乾燥密度を得る10%添加の場合の透水性がもっとも小さく、その減少の傾向は長期にわたっている。このことは前述の図-4とともにその長期反応の重要な役割りを実証するものである。もちろん、この場合にも長期透水による土粒子の流出が目づまりになって透水性の減少をきたす⁹⁾が、この場合の減少は、もっと緩慢である。これらの透水性の減少は、Croft¹⁰⁾もこのことに言及している。

4. マサ土中の一次鉱物と二次鉱物の形態的研究

マサ土中、よく風化したものはハロイサイト等の二次鉱物を多く含み、一次鉱物は、長石、石英、雲母が主である。また、石英、長石等の砂粒子の表面構造には、摩耗性、裂片性、結晶性、平滑面、起伏面、多孔面、侵食面、みぞ型面、せん断型等、約9種の表面構造を有することはすでに文献⁷⁾で詳説したからここでは省略する。そのほかに、後述のマサ石灰処理土の構造的写真的判読に必要なポリスチレンおよび、消石灰の締固め断面の電

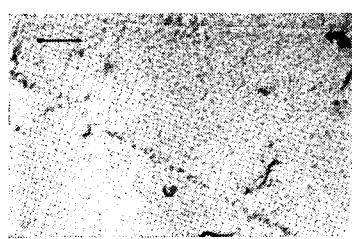


写真-1 ポリスチレン

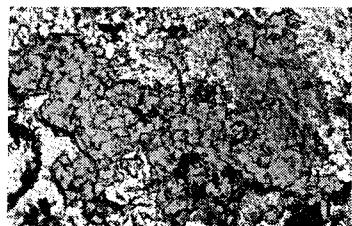


写真-2 締固めた消石灰の断面

顕写真を写真-1、写真-2に示した。ポリスチレンは、ほとんど無構造に近く、石灰は、ウロコ状のような形をしている。

5. マサ石灰処理土の構造的研究

石灰処理土の構造的研究には、石灰処理締固め土中の一次鉱物の形態的変化、二次鉱物の形態的変化や反応生成物の研究、および土-石灰-水の3相システムが形成するマトリックスの変化に関する研究がある。以下、マサ石灰処理締固め土について述べるが、比較のために、まず未処理マサ土の締固め断面を写真-3に示した。なお、この未処理断面は、著者らの別論文⁷⁾にも詳述しているので、ここでは詳述をさける。写真-3には、一次鉱物粒子の部分表面、二次鉱物粒子のランダムな配列で構成されている。

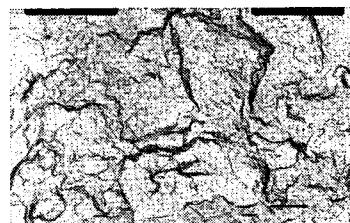


写真-3 締固めた未処理マサ土の断面

(1) マサ石灰処理土中の一次鉱物（石英、長石）の形態的変化（写真-4～6、図-10、11）

一次鉱物の石英に石灰処理をすると反応するか否かは明らかでないといわれている¹¹⁾。本研究では、長石と石

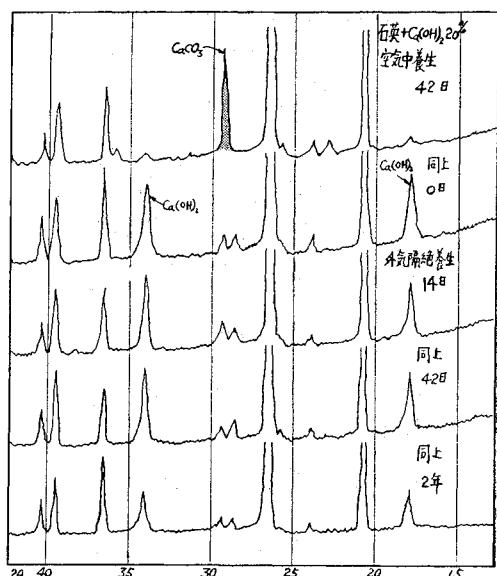


図-10 石英+石灰 20% の X 線回折図

英に20%の石英を加え、2年常温養生の結果をX線回折で調べた。その結果が図-10, 11である。この図によると、石英、長石とも反応しないことがわかる。一方、

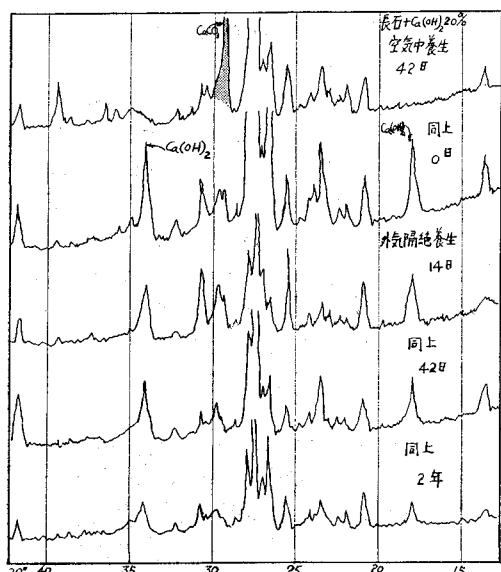


図-11 長石+石灰 20% の X 線回折図

マサ石灰処理土中の一次鉱物について、電子顕微鏡で観察した結果、写真-4～6に示したように、40週間も養生したにもかかわらず、反応を起こしていない。ただ、一次鉱物の表面がゲルらしきものでおおわれるか（写真-5, 6）、またはもともと多孔状であった表面構造⁷⁾が石灰によるアルカリ侵食の結果、一層大きいポーラスな表面構造（写真-4）になっている。ゆえに、一次鉱物に対する石灰の作用は、表面侵食と粘結性ゲルによる粒子間の物理的結合だけに限られるものと考えられる。

(2) 二次鉱物による反応生成物（写真-7～10、図-8）

反応生成物の判定には、電子顕微鏡による直接観察や電子回折、およびX線回折等を並用して、はじめて、完全な判定をなし得るものであるが、本研究による試料はレプリカ法を用いたので、電子回折はできなかった。それゆえ、この判定には、試料条件や過去の研究、およびセメント系反応生成物等の文献¹²⁾を参考にし、X線回折を同時に行なうことによって判定した。その結果、電顕観察では反応生成物のうち、CSH(II)系のものと考えられる写真-7～10のような纖維状または煙草状のものがみられる。ただし、写真-8の棒状のものは、未反応

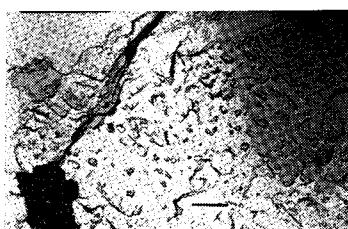


写真-4 一次鉱物の変化 11週



写真-7 反応生成物 3週

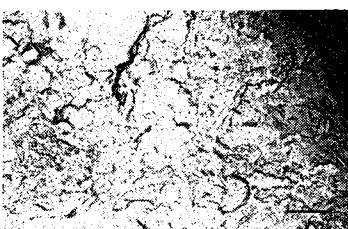


写真-5 一次鉱物の変化 22週

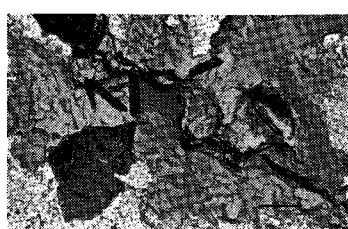


写真-8 5週



写真-6 一次鉱物の変化 40週



写真-9 8週



写真-10 40週



写真-13 8週

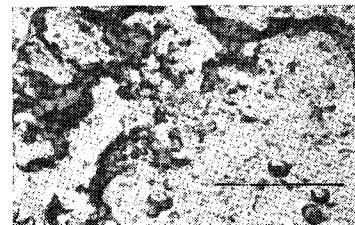


写真-14 8週

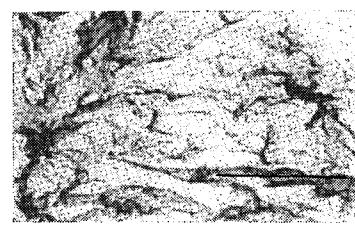


写真-15 8週

のハロイサイトの周辺がゲルにおおわれつつあるものであって、反応生成物ではない。写真-9のような纖維状の反応生成物は表-2に述べているミクロ的摩擦力をあたえ、構造体の中において、一種のコンクリート中の鉄筋のような働きをするものといわれている⁶⁾。

図-8 の塩酸処理によるX線回折図では C_4AH_{13} の強ピーク $3.95, 2.86, 2.45 \text{ \AA}$ は現われているが、主要ピーク 8.2 \AA は現われていないので反応生成物と断定しがたい。しかし、この場合、試料は最適含水比付近の水分で養生したものなのでX線の主要ピークは現われないことが Hilt¹²⁾ らによって実証されている。

電子顕微鏡では、この生成物をも見いだすことはできなかった。この C_4AH_{13} の反応生成物は土質工学的条件に適合した常温型の生成物であり、Hilt らにより高含水比のモンモリナイト石灰処理土の長期養生試料からも判定されている。

(3) ソイルライム系の融合（写真-11～15）

分立している土粒子と石灰粒子が時間の経過とともにどのように変化し、次第に合体癒着し、あるいは、溶けあっていくかの問題は、石灰安定処理土のメカニズムを研究していく上において重要な問題である。このような問題は、養生供試体を用いて、その構造を保ったままで電子顕微鏡を用いて観察する以外に方法はない。このよ

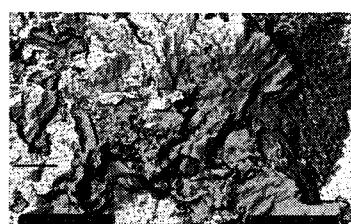


写真-11 ソイルライムの融合現象 3週

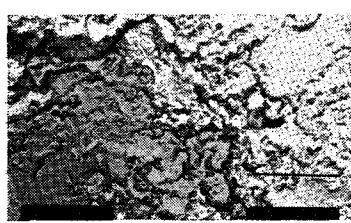


写真-12 8週

うな研究は、一部、ソイルセメントについて Mitchell ら¹⁴⁾が報告しているが、石灰安定処理土には、いまだにみあたらない。写真-11～15は、このソイルライムの融合の状態を示したものである。写真-11では、まだ十分にゲル化していない未反応の石灰と土粒子をおおったゲルがみられる。写真-12ではこのシステムは、やや均質になり、ある領域では石灰粒子の膨張したものとみられる写真-13、14のような粒質状のものがある。写真-15は完全に「溶接」しあった状態であり、反応の最終状態か、反応生成物発生の基盤を構成するものと思われる。写真-12～15はすべて、8週間養生のものであり、同一養生区間にこのように異なる相を見るることは、マトリックスの変化の非等速性を裏づけるものである。この非等速性が同一養生日数供試体における一

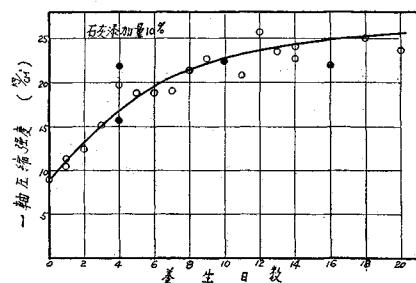


図-12 養生日数と一軸圧縮強度の関係

軸圧縮試験強度のバラツキを与え、破壊様式にも一定性をもたせない原因と思われる。このことは、また、図一6の反応速度に無関係な反応パーセントと q_u の関係ではバラツキが小さく、それに対応する供試体から求めた図一12では、バラツキが大きい原因を裏づけるものである。なお、図一12中の黒点は、図一5、図一6の黒点に対応したものである。

(4) マトリックスの変化(写真一16~20)

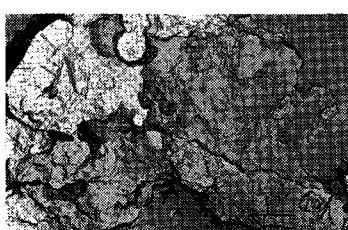
写真一16では、粒子間に入りこんだ石灰粒子があり、わずかにその表面から針状の結晶をのばしつつある。のり状の滑らかな面をなしたものは、粒子間の間げきであり、粒子の辺縁に多くゲル状物質がある。写真一17には、表面から成長したゲル状物質があり、この先端のまき上がりは、ゲル状物質の脱水の結果によるものである。このまき上がり現象は、Willoughby ら⁶⁾、あるいは Croft¹⁴⁾によっても報告され、安定処理土の脆性的な性質を支配する。写真一19、20では、40週養生になっても、まだ、石灰の影響をうけない領域や、石灰粒子の完全に反応しつくしていない状態が存在することを示している。締固め土のような限られた水分のもとでは、Ca⁺⁺イオンの緩慢な移動や水分の不足等が原因になり、マトリックスの変化が等速におこなわれることが困難であることを示すものである。



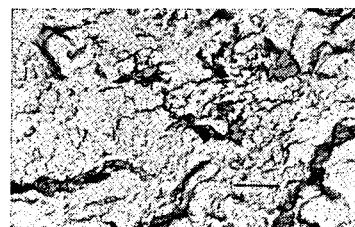
写真一16 マトリックスの変化 3週



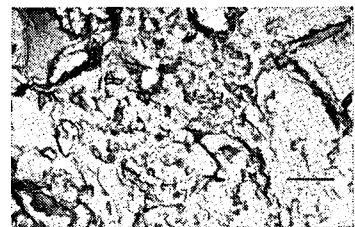
写真一17 8週



写真一18 22週



写真一19 40週



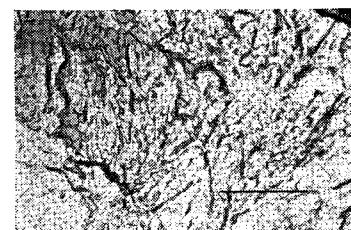
写真一20 40週

6. ベントナイト石灰処理土(消石灰添加10%)の構造的研究(写真一21~27)

ベントナイトはモンモリナイトを主成分とする粘土であり、カオリンにくらべて反応性の良い代表的粘土とされているが、図一13のX線回折の結果は、反応生成物のピークが表われなかった。また、電子顕微鏡による観察でも発見されていない。写真一21、22は、未処理ベントナイト締固めの代表的な断面である。写真一21では、板状面が良く現われた方であり、写真一22は、辺縁の方が多く現われた例である。分散状のモンモリナイトは、不定形で周辺にケバ状のものがみられるのが特徴的であるが、写真一23にもそれがみられる。写真一23は2週間養生のものであるが、多孔状の断面をしており、



写真一21 締固めた未処理のモンモリナイト断面



写真一22 締固めた未処理のモンモリナイト断面

あまり、石灰侵食の後がみられない。写真-24には、未反応の石灰を囲む周辺のまき上った土粒子の集まりがみられる。写真-25はまき上った土粒子の辺縁がゲルや非晶質物質に埋没しようとするさまである。しかし、写真-26, 27に示すように、25週以後にも、まだまだ多くの土粒子が徐々に変形変質をしながらも原形を保つ

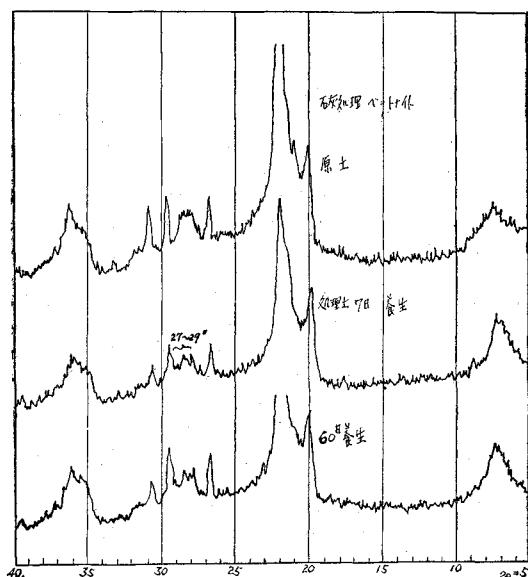


図-13 石灰処理ベントナイトのX線回折図

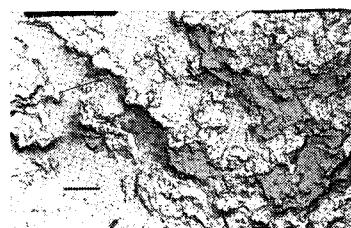


写真-23 石灰処理モンモリナイトのマトリックスの変化

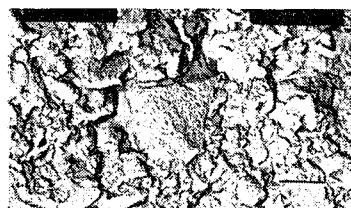


写真-24 マトリックス変化 4週

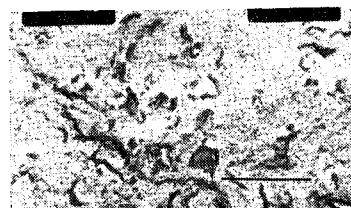


写真-25 7週

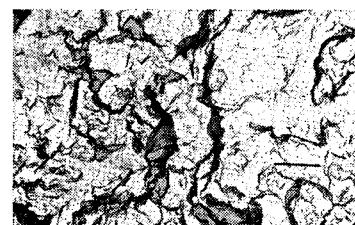


写真-26 25週

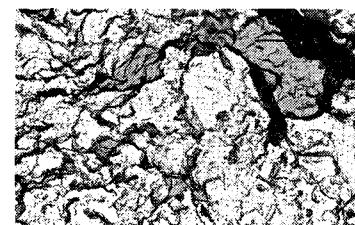


写真-27 41週

ていることは、やはり、マトリックス変化の非等速性を示すものである。写真-27では、ステップ状にならべられた土粒子の辺縁侵食と空げきをうめるゲル、そのほかわざながら未反応の石灰粒子がまたみられる。なお、写真中の棒線は、特に注記しない限り、すべて一ミクロンを示す。

7. 結 論

以上のX線および電顕観察の結果を総括的に述べると次のようになる。

- (1) 生成反応物には電子顕微鏡により CSH(II)型の纖維状物質、煙草状のもの等がみられる。この生成物は、マトリックス中において、その表面の粗度による摩擦力の増加、纖維状、あるいは棒状物質のからみ合いによる鉄筋のような役目から、ミクロ的摩擦力を形成する。それは、また長期養生強度の一部、あるいは全部をなっている。
- (2) 一般に養生7週間後にゲル生成物が普遍的にみられる。
- (3) 最適含水比付近の有限水分を有するマトリックスの変化は等速ではない。また、一次鉱物粒子表面、あるいはそれに囲まれた地点での反応は進みにくい。未反応石灰がそこに多くみられる。
- (4) 2次鉱物よりなるマトリックスは、第7週以後に各分立粒子、石灰などの境界が不明瞭になり、一体化する傾向がみられる。
- (5) 試料切断方向による構造の違いはみられない。
- (6) ベントナイト石灰処理土では40週以上の養生でも反応生成物がみられない。
- (7) 砂質土の強度発生は、炭酸作用によるものが多

く一軸圧縮強度と直線関係を保っている。

(8) ゲルの生成は、電顕観察のほかに、塩酸処理による新ピークの出現、鮮明度、およびピーク強度の増加から証明できる。

(9) 石英、長石のような一次鉱物は、常温では石灰と反応しない。

(10) 紙面の都合で十分に論じ得ない電子顕微鏡よりみた石灰処理土の問題点を簡単に表-3にあげる。この問題点は、本研究における電顕観察の結果、およびその他の文献^{1), 4), 5), 6)}にもあげられた問題点を一括して、述べたものである。

最後にこの研究を完成するにあたり、実験の一部を担当していただいた元大学院生、大藤 進君、中村嘉次君に感謝の意を表する。

表-3 電子顕微鏡より見た安定処理土の問題点

現 象	問 題 点	注
反 応 生成 物	種類形態、結晶度、発生位置、時間など	CSH(I)は巨大粒子の周辺に集中? 反応速度
表面または 辺縁 侵 食	粘度粒子をエアとする周辺吸収、八面体または四面体上の侵食	表面吸着反応か、または溶液反応か?
ク ラ ッ ク	侵食クラックはランダムか、網状か?	
分 立 小 粒 子	大粒子より反応の結果分離? 黒点は結晶度不良の反応生成物か?	
非 晶 物 質	粘土粒子表面、周辺および粒子間にどのように存在しているか?	
けい酸塩 残 潲 (Silicate Relics)	反応の残滓物であるか?	
粒 径 減 少	侵食または反応の結果であるか?	
締固めマトリックスの変化	粘土鉱物と安定材の融合、溶接1次鉱物の変化	
倍 率 変 化	高、低倍率による構造差	
構 造 単 位	反応生成物は分散状、またはクラスターをなしているか?	
薄 片 状 粒 子	反応生成物がまたは原粘土鉱物より剥落したものか?	

参 考 文 献

- Sloane, R.L. (1964) : Early Reaction Determination in Two Hydroxide-Kaolinite Systems by Electron Microscopy and Diffraction. Clays and Clay Minerals, Proc. 13th, Conf. 25, 331~339.
- Diamond, S., White, J.L. and Dolch, W.L. (1963) : Transformation of Clay Minerals by Calcium Hydroxide Attack, Clays and Clay Minerals, Proc. 12th, Conf. 19, 359~379.
- 有泉 昌 (1965) : 消石灰一石コウを使用するアロフェン粘土の土質安定処理法に関する研究, 粘土科学の進歩(5), 技報堂, 東京, 207~218.
- Mitchell, J.K. and El Jack, S.A. (1966) : The Fabric of Soil-Cement and its Formation. Clays and Clay Minerals, Proc. 14th, Conf. 26, 297~305.
- Ormsby, W.C. and Boly, L.H. (1966) : Microtexture and Composition of Reaction Products in the System Kaolin-Lime Water. J. Amer. Cer. Soc., 49, 364~366.
- Willoughby, D.R., Gross, K.A. etc. (1968) : The Identification of Reaction Products in Alkali-Stabilized Clays by Electron Microscopy, X-ray and Electron Diffraction, Proc. 4th, Conf. Austr. Rd. Res. Bd. 1~23.
- 松尾新一郎・宋永焜 (1971) : 締固め土の構造と工学的性質の相関性に関する微視的研究, 土木学会論文報告集, 第189号, 63~78.
- Eades, J.J. and Grim, R.L. (1960) : Reaction of Hydrated Lime with Pure Clay Minerals in Soil Stabilization, H.R.B. Bull. 262, 51~63.
- 松尾新一郎・大井洋輔 (1968) : 土の透水性規制に関する研究, 土木学会関西支部年次学術講演会 III-17.
- Croft, J.B. (1967) : The Structures of Soils Stabilized with Cementitious Agents. Eng. Geol. 2(2), 68~80.
- Diamond, S. and Kinter, E.B. (1965) : Mechanisms of Soil-Lime Stabilization An Interpretative Review, H.R.R. No. 92, 83~102.
- Hilt, G.H. and Davidson, D.T. (1961) : Isolation and Investigation of a Lime-Montmorillonite Crystalline Reaction Product, H.R.B. Bull. 304, 51~64.
- Jaylor, H.F.W. (1964) : The Chemistry of Cement, Vol. I, II.
- Croft, J.B. (1964) : The Process Involved in the Lime Stabilization of Clay Soils, Proc. 2nd Conf. Aust. Rd. Res. Bd. 2, 1169~1203.

(1970.12.28・受付)