

# 脱硫副生産物による土質安定処理

## SOIL STABILIZATION BY THE USE OF FLUE GAS DESULFURIZATION BY-PRODUCT

はさ ば しげ まき\* かわ むら みつ のり  
 棚 場 重 正\* 川 村 満 紀\*\*  
 とり い かず ゆき\*\*\* たか せ ひろし  
 鳥 居 和 之\*\*\* 高 瀬 博\*\*\*\*

表一 使用土の物理的性質

	粘性土 I	粘性土 II	砂質土
砂 分 (%)	27.4	32.8	76.5
シルト分 (%)	44.6	62.1	17.5
粘土分 (%)	28.0	5.0	6.0
液性限界 (%)	59.8	54.3	—
塑性限界 (%)	34.7	31.0	—
塑性指数	25.1	23.3	—
最適含水比 (%)	32.5	28.1	23.4
最大乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.294	1.456	1.570
比 重	2.741	2.653	2.677

### 1. ま え が き

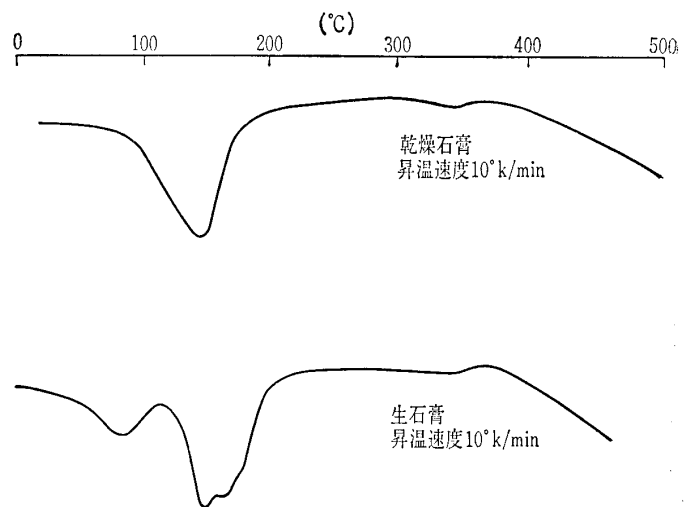
火力発電所、化学工場などにおいて発生する亜硫酸ガスの処理に伴って、石膏を主成分とする多量の脱硫副生産物が発生し、その廃棄が大きな問題となっている。この副生産物の化学成分から考えて、道路舗装および盛土斜面における土質安定処理剤として利用できる可能性がある。消石灰—石膏添加によるアロファン質土の安定処理の有効性が有泉・大場によって確かめられており、またその基礎的な化学反応機構についても報告されている<sup>1),2)</sup>。これらの研究結果から考えて、通常の粘性土においても、脱硫石膏—消石灰添加によってセメントパチルスを生成させることによって土質安定処理を行なうことは十分期待できる。しかし、脱硫副生産物は通常20%程度の自由水を含む2水石膏として生成するので、実際には、そのままの状態での石灰—石膏系の安定処理剤としての使用可能性およびポルトランドセメントとの混用の有効性などについて検討する必要がある。本報告は粘性土および砂質土を含む3種類の土を用いた脱硫石膏—石灰および—セメント安定処理土における初期から長期材令にわたる安定剤の配合割合と一軸圧縮強度の関係から脱硫石膏添加の有効性について実験的検討を加えたものである。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料

2種類の粘性土は長期間室内において自然乾燥させ、ときほぐし機によってときほぐしたものである。各使用土の物理的性質は表一に示すとおりである。使用した脱硫石膏は熱処理しないもの（生石膏）および熱処理（150℃の炉中にて24時間乾燥）したもの（乾石膏）である。使用セメントおよび石灰はそれぞれ普通ポルトランドセメントおよび工業用消石灰である。本報告においては、使用した各添加剤をつぎのような記号によって示す。G：乾石膏，G'：生石膏，C：ポルトランドセメント，L：消石灰

図一は本実験において使用した生石膏および乾石膏の



図一 乾燥石膏および生石膏の D. T. A 曲線

示差熱分析曲線 (D. T. A 曲線) を示したものである。図一より、生石膏においては半水化（二水石膏中の2分子のうち $\frac{3}{2}$ 分子の水が解離する）および無水化（2分子の水の解離）による2つの吸熱ピークが存在するが、乾石膏においては140℃前後に1つの吸熱ピークが存在するのみであり、150℃において炉乾燥した脱硫石膏は半水石膏が主成分であることがわかる。

#### 2.2 実験方法

供試体は直径5cm、高さ10cmの円柱体であり、締め試験によって求めた最適含水比、および最大乾燥密度となるようにジャッキによって静的に締め固めたものである。

\* 工博 金沢大学教授 工学部  
 \*\* 工博 金沢大学助教授 工学部  
 \*\*\* 工修 金沢大学助手 工学部  
 \*\*\*\* 北陸電力株式会社 土木部長

配合としては、石膏—石灰および石膏—セメントの各組合せについて土試料の乾燥重量の10%、20%および30%を添加して、石膏の石灰またはセメントに対する比率(重量比)を3、1および1/3と変化させた。供試体は各3本ずつ作成し、ビニール袋によって密封し、恒温恒湿室(温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度90%)において所定期間中養生した後、一軸圧縮強度および体積膨張率を測定した。また、2、3の代表的な石膏—石灰安定処理土供試体の一部分より試料を採取し、室温において真空乾燥を行ない、炭素および金によって蒸着した後、走査型電子顕微鏡(SAM—SX、島津社製)による観察を行なった。上述の脱硫酸石膏のD.T.A曲線(アルミナ標準試料、容器はアルミニウム、加熱速度 $10^\circ\text{K/分}$ )は理学電気機製のサーモフレックスによって得たものである。

### 3. 実験結果

#### 3.1 粘性土 I を使用した各種安定処理土の一軸圧縮強度

粘性土 I を使用した各種安定処理土の一例(添加量: 20%)の一軸圧縮強度と材令の関係を示すと図-2のとおりである。図-2より乾石膏—石灰安定処理土においては添加量が同一であっても乾石膏と石灰の配合比(G/L)によって一軸圧縮強度が大きく相違していることがわかる。図-3よりあきらかなように、28日材令までの初期材令においてはG/L=1が最大の強度を示し、3か月および6か月材令強度はG/L=1/3において最大となる。石膏添加量が多いG/L=3の材令に伴う強度増加は顕著ではなく、初期材令においては石灰処理土と同程度の強度を示すが、3か

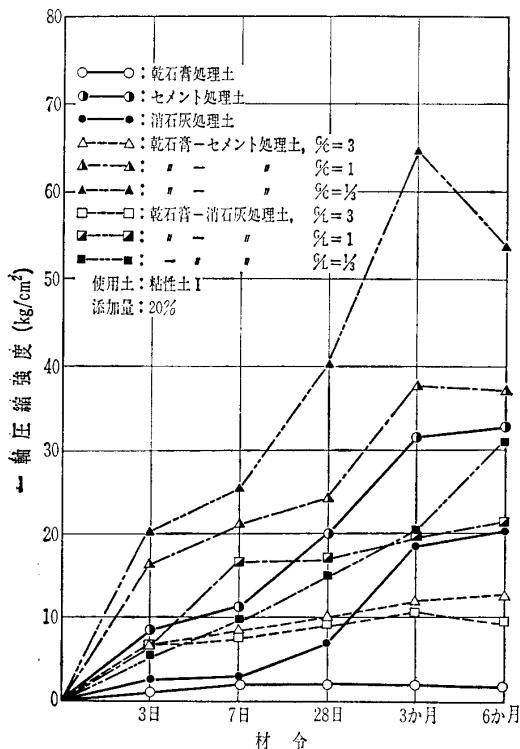


図-2 粘性土 I を使用した各種供試体の一軸圧縮強度と材令の関係(添加量: 20%)

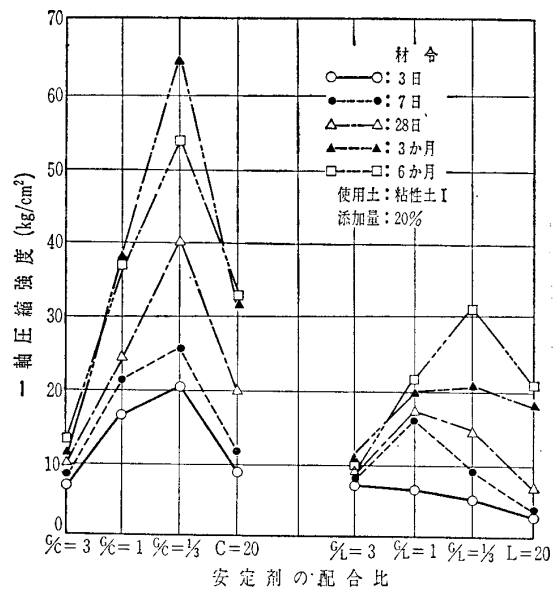


図-3 粘性土 I を使用した乾石膏—セメントおよび—消石灰安定処理土(添加量: 20%)における安定剤の配合比と一軸圧縮強度の関係

月および6か月材令におけるG/L=3の強度は石灰処理土よりもはるかに小さい。これらの事実より、石灰安定処理において添加する石灰の半分または1/4を半水化した脱硫酸石膏によって置換すると、強度はいずれの材令においても増加し、さらに3/4を石膏によって置換しても初期材令においては石灰単味よりやや大きい強度を示すことがあきらかである。

乾石膏—セメント安定処理においても乾石膏—石灰安定処理土と同様に乾石膏置換率の小さいG/C=1/3が特に大きな強度を示し、材令3か月において約 $65 \text{ kg/cm}^2$ に達する(図-2および図-3)。図-3よりあきらかなように、乾石膏—セメント系は乾石膏—石灰系よりも石膏の混入割合による強度差が著しく、粘性土 I のセメント安定処理土においては添加するセメントの1/4を乾石膏によって置き換えることによってセメントのみによる安定処理土の約2倍の強度を得ることができる。しかし、乾石膏—石灰系と同様に石膏置換率の大きいG/C=3においては、セメント処理土よりかえって強度は小さくなる。

添加量30%における生石膏—石灰および生石膏—セメント処理土の材令に伴う強度増加の特徴を乾石膏添加の処理土と比較すると図-4および図-5のようである。石膏—石灰系においてはG/L=3を除いていずれの材令の強度も生石膏と乾石膏間にはあまり大きな差はないが、全体として生石膏の方が乾石膏よりやや小さい強度を示す(図-4)。一方、生石膏—セメント系の強度は28日までの材令においては平均して乾石膏—セメント系よりも20%前後小さくなるが、長期材令においては両者間にほとんど強度差は認められない(図-5)。このように粘性土 I のセメントまたは石灰安定処理土において、添加する石灰またはセメントの一部分を脱硫酸石膏で置き換えて使用する限り、脱硫

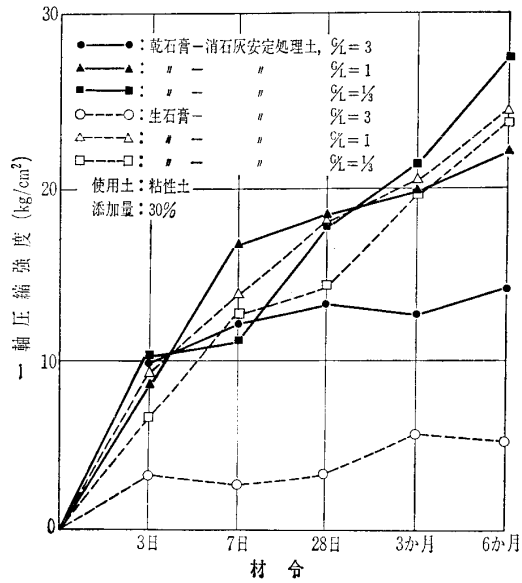


図-4 乾石膏—および生石膏—消石灰安定処理土（粘性土 I 使用）の一軸圧縮強度と材令の関係（添加量：30%）

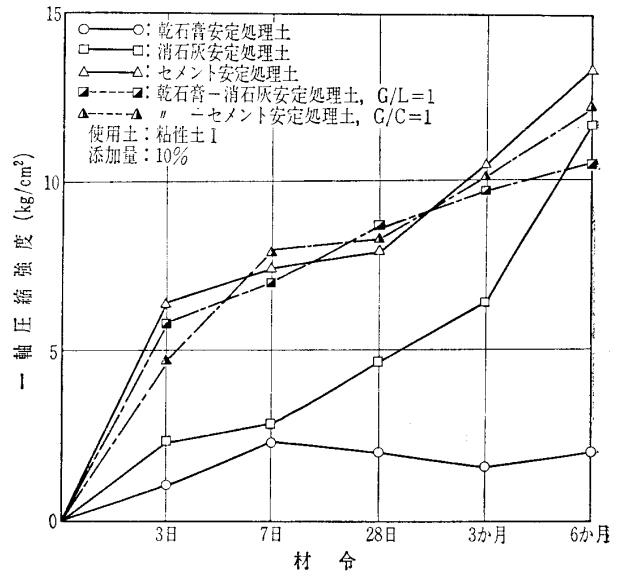


図-6 粘性土 I を使用した各種供試体の一軸圧縮強度と材令の関係（添加量：10%）

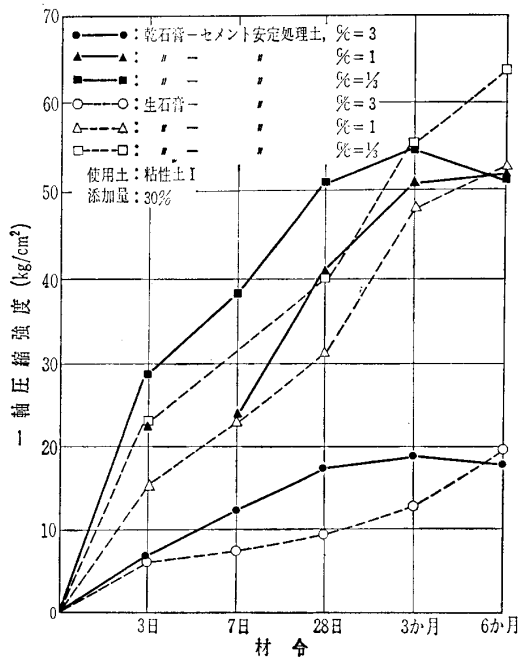


図-5 乾石膏—および生石膏—セメント安定処理土（粘性土 I 使用）の一軸圧縮強度と材令の関係（添加量：30%）

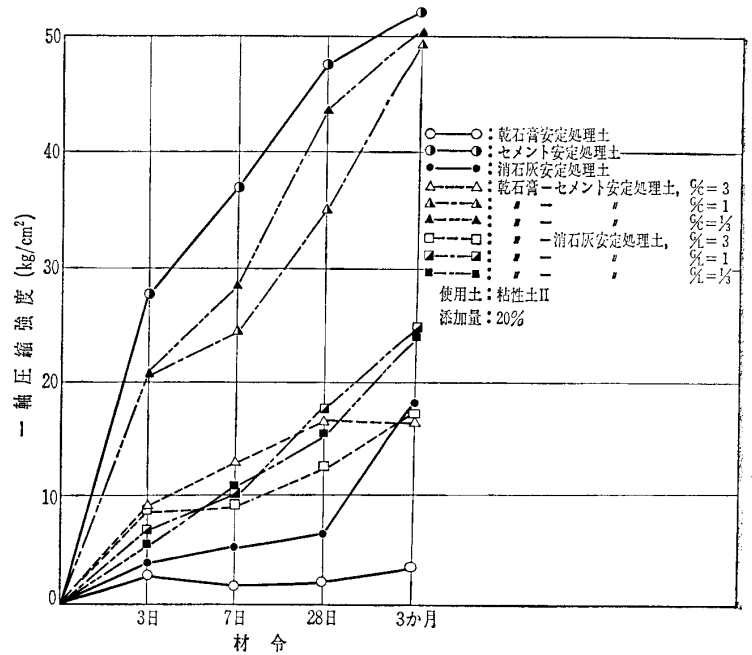


図-7 粘性土 II を使用した各種供試体の一軸圧縮強度と材令の関係（添加量：20%）

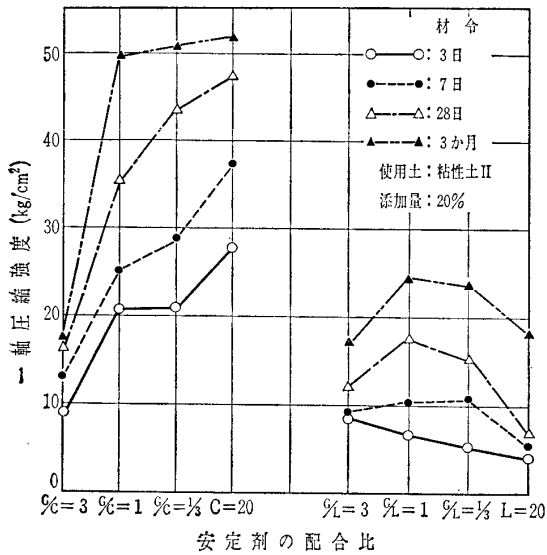
石膏を乾燥することなく、2水塩のまま用いても半水石膏添加のものに比べて強度が大きく低減することはない。また、低添加量（10%）における強度発現状況を図-6に示す。

### 3.2 粘性土 II および砂質土を使用した各種安定処理土の一軸圧縮強度

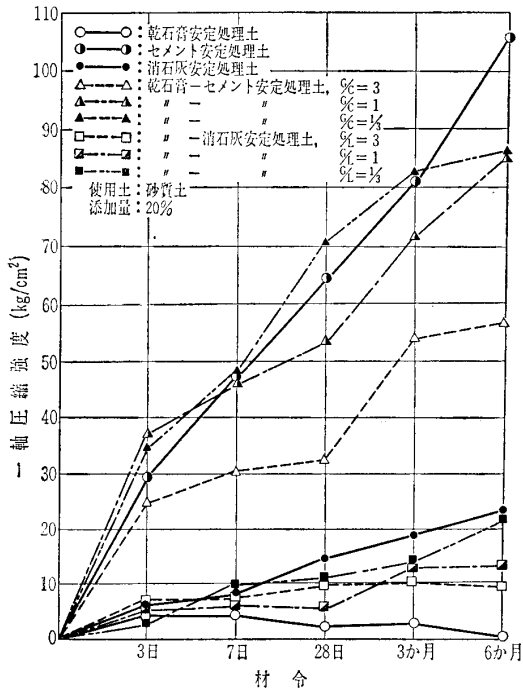
粘性土 I より粘土分の少ない粘性土 II における添加量20%の各種安定処理土の材令に伴う一軸圧縮強度の増加状況は図-7に示すとおりである。粘性土 II の乾石膏—石灰処理土は粘性土 I とほとんど同様な強度特性を示す（図-8）。

一方、図-8より粘性土 II の乾石膏—セメント安定処理土の28日材令までの初期強度は粘性土 I よりも大きく、ま

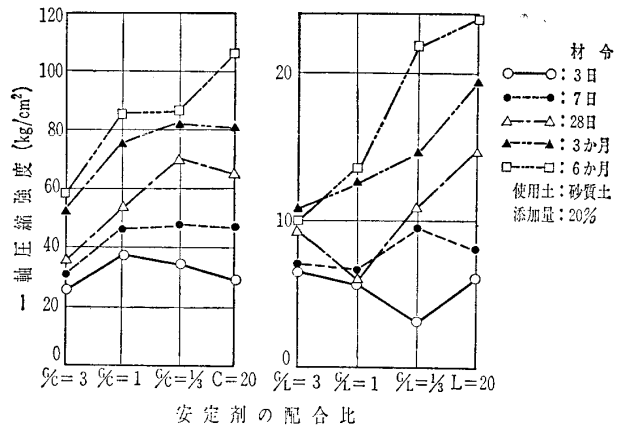
た粘性土 I と異なりセメントのみを添加したものがいずれの材令においても最大の強度を示す。すなわち、粘性土 II においては、セメントの一部を石膏によって置換することによって強度は低下し、特に石膏の置換割合の大きい G/C=3 における強度低下は著しい。粘性土 II よりさらに粘土分の少ない砂質土における添加量20%の強度特性は図-9および図-10に示すとおりである。図-10よりあきらかなように、砂質土のセメントおよび石灰安定処理土のいずれにおいても、セメントまたは石灰の一部を石膏によって置換することによって長期材令ではかなり強度は低下するが、3日および7日の初期材令ではあまり大きな変化はないようである。このように、粘性土 II および砂質土に



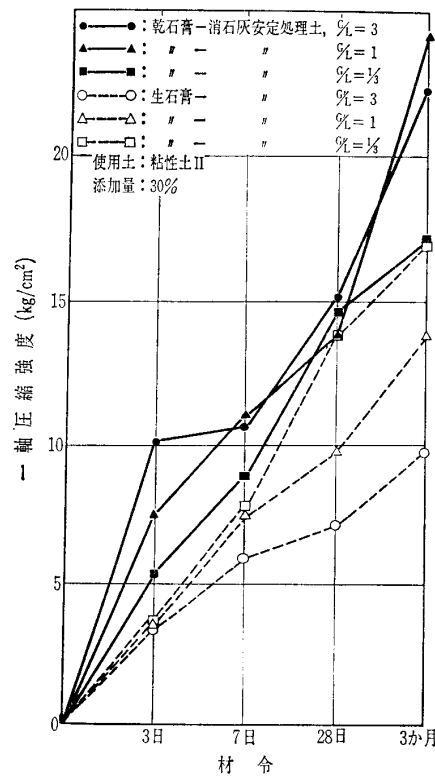
図一八 粘性土IIを使用した乾石膏—セメントおよび—消石灰処理土（添加量：20%）における安定剤の配合比



図一九 砂質土を使用した各種供試体の一軸圧縮強度と材令の関係（添加量：20%）



図一〇 砂質土を使用した乾石膏—セメントおよび—消石灰安定処理土（添加量：20%）における安定剤の配合比と一軸圧縮強度の関係



図一一 乾石膏—および生石膏—消石灰安定処理土（粘性土II使用）（添加量：30%）の一軸圧縮強度と材令の関係

において添加する石灰またはセメントの一部を脱硫石膏によって置換すると強度が低下する 경우가多いが、実用的には、一定セメント量または石灰量に対する強度について比較すると乾石膏添加によって有利になる。図一11および図一12は粘性土IIにおける生石膏と乾石膏使用による強度差を示したものである。これらの図より、粘性土IIにおいては生石膏を使用した安定処理土の強度は乾石膏よりもかなり小さいことがわかる。生石膏と乾石膏使用による強度差は砂質土の処理土においてさらに大きくなる（図一13、図一14）。砂質土および粘性土IIにおける低添加量（10%）の安定処理土の強度発生状況は図一15および図一16に示すと

おりである。これらの図より、使用セメント量または石灰量が5%程度であっても適切に脱硫石膏量を選択することにより、土質安定剤として有効に利用できることがわかる。

### 3.3 各種安定処理土の膨張

一般にセメントパチルス生成時において過度に生ずる膨張は強度に望ましくない影響を及ぼすと考えられる。石膏—セメント処理土の体積膨張率は約15%程度であるが、乾石膏—石灰処理土は図一17に示すように砂質土では最大50%にも達する大きな膨張を示し、膨張量は土質添加剤の配合割合によって異なり、乾石膏—石灰系ではG/L=1のとき最大となる。図一17より明らかなように、粘性土Iに比べて砂質土の膨張率は特に大きく、図一10に示されるよう

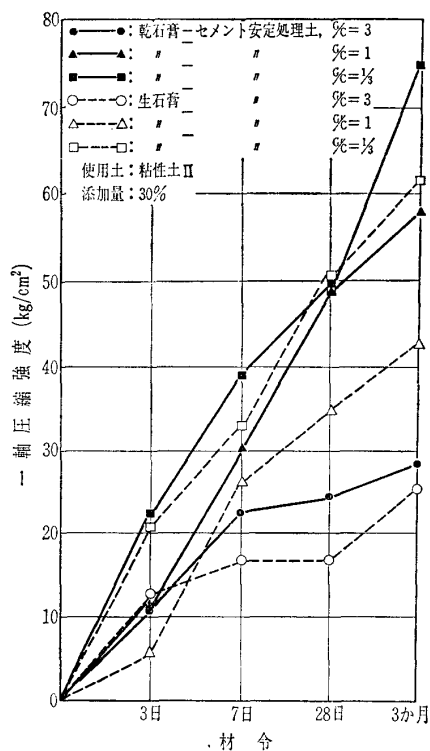


図-12 乾石膏一および生石膏一セメント安定処理土（粘性土 II 使用）の一軸圧縮強度と材令の関係（添加量：30%）

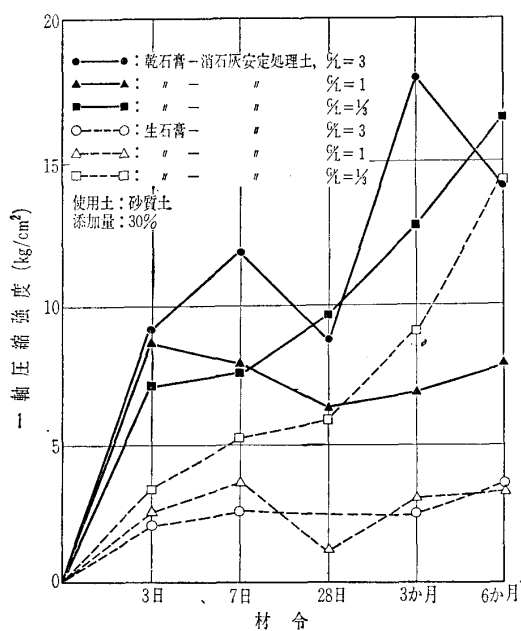


図-13 乾石膏一および生石膏一消石灰安定処理土（砂質土使用）の一軸圧縮強度と材令の関係（添加量：30%）

に、砂質土の  $G/L=1$  において強度の発生が悪い。一方、粘性土 I では  $G/L=1$  において膨張率は大きい、初期材令において  $G/L=1$  が最大の強度を示し、長期材令においても  $G/L=1$  は  $G/L=1/3$  について大きな強度を示す。これらの事実より、砂質土に見られる大きな膨張は強度にかなり悪い影響を及ぼすが、粘性土 I において生ずる程度の膨張量では強度を低下させることはないようである。この違いは土粒子間の空ゲキおよびセメントバチルスの結晶の大きさ、粒子間の粘着力などによるようである。

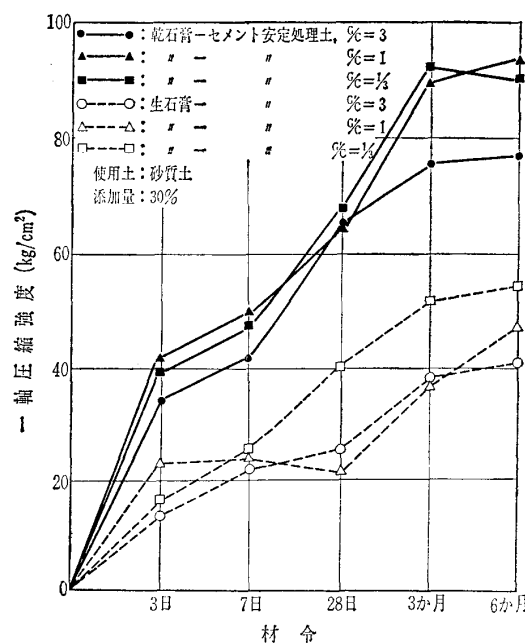


図-14 乾石膏一および生石膏一セメント安定処理土（砂質土使用）の一軸圧縮強度と材令の関係（添加量：30%）

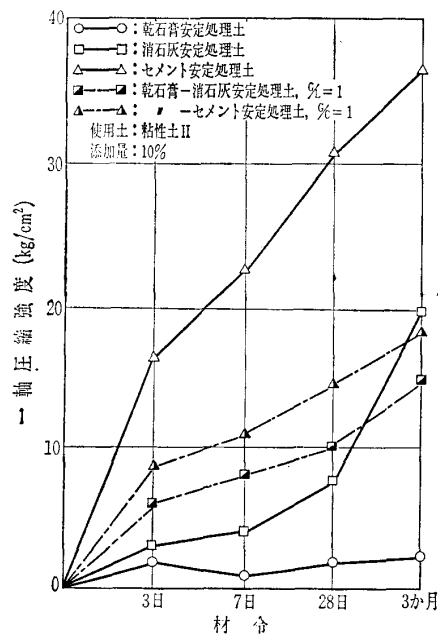


図-15 粘性土 II を使用した各種供試体の一軸圧縮強度と材令の関係（添加量：10%）

#### 4. 考察とまとめ

石膏一石灰またはセメント安定処理土においては、従来の石灰またはセメント安定処理土において生ずる反応生成物以外に土中の粘土鉱物より供給されるアルミナと石灰および石膏間の反応によって生成するセメントバチルスが大きな役割を果たすと考えられる<sup>1)</sup>。実際に、本実験に使用した供試体 ( $G/L=1$  および  $G/L=1$  添加量20%, 材令, 3か月および6か月, 使用土: 粘性土 I) 内部の走査型電子顕微鏡写真 (写真-1, 2) より、かなり多量のセメントバチルスが生成していることが確認された。前述のように粘土含有量の異なる土質は異なる強度特性を示し、

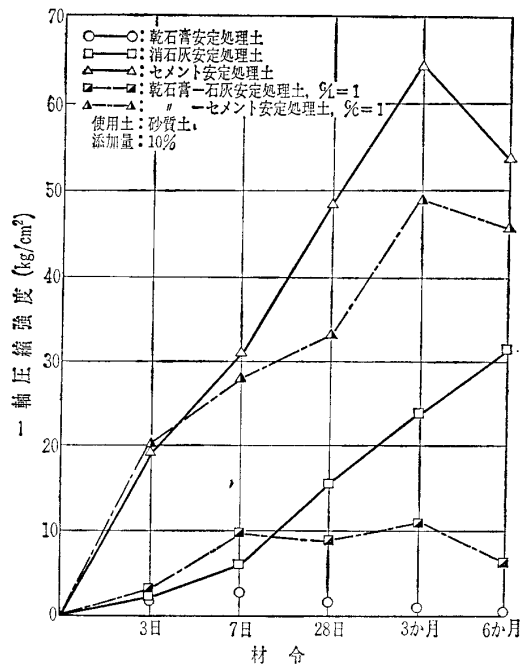


図-16 砂質土を使用した各種供試体の一軸圧縮強度と材令の関係 (添加量: 10%)

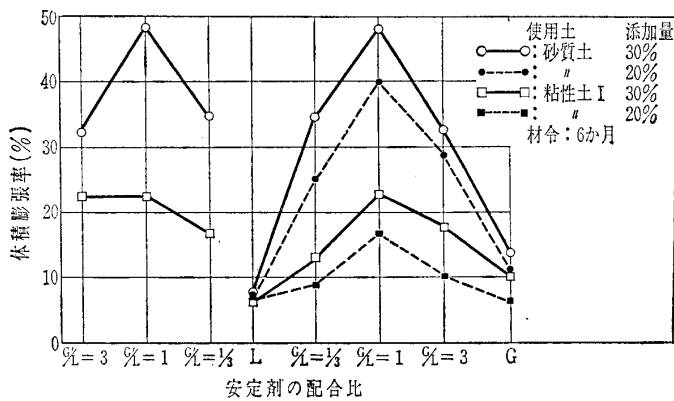


図-17 粘性土Iおよび砂質土を使用した乾石膏一および生石膏-石灰安定処理土の体積膨張率と安定剤の配合比の関係

また、セメントバチルスの生成によると考えられる膨張の大きさがある配合割合において最大となる。これらの事実から判断して、石膏-石灰またはセメント安定処理土においては安定剤の配合比だけでなく、反応に利用できるアルミナの量もセメントバチルスの組成および生成量に大きく影響すると考えられる。したがって、本実験において使用した安定処理土に、さらにアルミナの供給源となる材料を添加することによって、脱硫酸石膏をさらに有効に利用できる可能性がある。

実用上脱硫酸石膏を乾燥することなく、2水塩のままで使用することが望ましいが、土質によっては(本実験では粘土分の少ない土)半水石膏使用のものに比べてかなり強度は小さくなる。このことは石膏の自硬性の有無のみによって説明することはできないので、今後その原因と対策についての研究が望まれる。

得られたおもな結果をまとめるとつぎのようである。

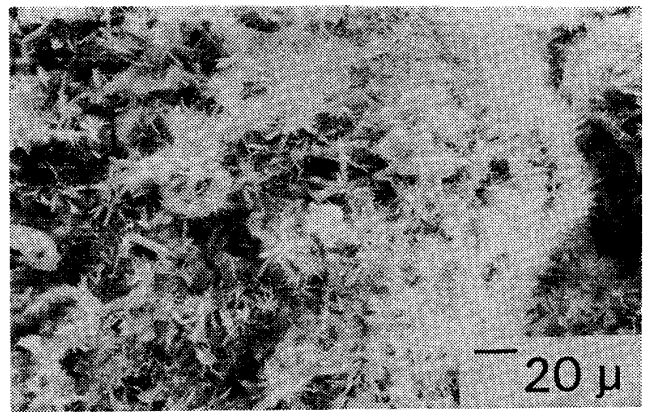


写真-1 乾石膏-石灰安定処理土, 供試体内部の走査型電子顕微鏡写真(材令: 3か月, 使用土: 粘性土I)

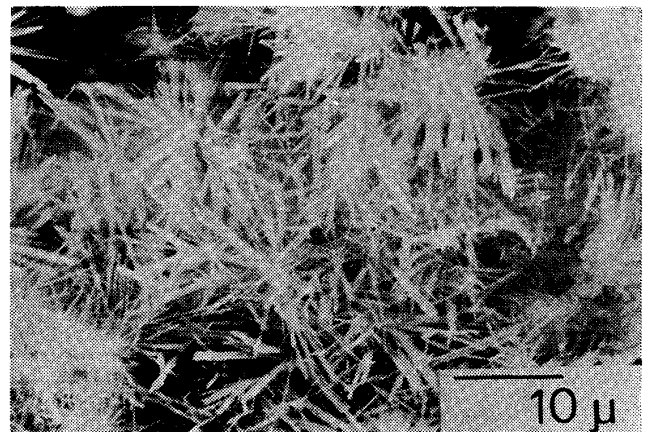


写真-2 生石膏-石灰安定処理土, 供試体内部の走査型電子顕微鏡写真(材令: 3か月, 使用土: 粘性土I)

- (1) 粘性土Iにおいては、石灰安定処理として添加する石灰の半分、または1/4を半水化した脱硫酸石膏によって置換することによって、強度はいずれの材令においても増加し、さらに、石灰の3/4を置換しても、初期材令では石灰のみよりやや大きい強度を示す。
- (2) 粘性土Iのセメント安定処理土においては、添加するセメント量の1/4を乾石膏によって置換すると、強度はセメントのみによる処理土の約2倍になる。
- (3) 粘性土Iのセメントまたは石灰安定処理土において脱硫酸石膏を、石灰またはセメントの一部に置き換えて使用する限り、石膏置換率の大きい配合を除いて脱硫酸石膏を乾燥することなく、2水塩のままで使用しても半水石膏添加のものに比べて強度が大きく低下することはない。
- (4) 粘土分の少ない粘性土IIおよび砂質土は粘性土Iとかなり異なった強度特性を示す。
- (5) 粘性土IIおよび砂質土においては、脱硫酸石膏を2水塩のままで使用すると、半水石膏を用いた処理土より強度はかなり小さくなる。

参 考 文 献

- 1) 有泉 昌・大場正男: アロファン質粘土の消石灰-石膏による化学安定処理方法に関する研究(5): 土木研究所報告 119号, 83, 昭39
- 2) 有泉 昌・牧 隆正: 同上(6): 土木研究所報告 (原稿受理 1978.1.28)