

有機質土の性状と施工性に関する研究 (その1)

—セメント系安定処理による強度特性について—

齋藤二郎 細谷芳巳
西林清茂

Studies on Characteristics of Organic Soils and their Applications (Part 1)

—Strength Characteristics of Organic Soils Stabilized with Cement, Etc.—

Jiro Saito Yoshimi Hosoya
Kiyoshige Nishibayashi

Abstract

The authors performed stabilization treatments on peaty soils, handling of which had been almost hopeless in the past, with the purpose of effectively utilizing them as construction materials, and investigated strength characteristics in the laboratory. The mean water content of the organic soil considered was 260% and the organic content 45%. Four additives were added to the organic soil, i.e., (1) quicklime, (2) portland cement, (3) portland cement and calcined gypsum, and (4) natural soils (river sand, pit sand, Kanto loam), varying mixing rates and curing periods in many ways, and a series of soil tests such as unconfined compression tests, triaxial compression tests (U-U tests), water content tests, pH-value tests, X-ray diffraction, etc., were carried out.

As a result, the facts below were confirmed for the present: (i) individual addition of quicklime or portland cement contributes to reduction in water content, but has little effect with regard to strength, (ii) in addition of portland cement plus calcined gypsum, the effect of calcined gypsum as an aid in strength gain is high, (iii) there is an optimum mix ratio for the above, and (iv) the influence on strength increase of pit sand is greater compared with river sand.

概 要

従来その取扱いに苦慮していた泥炭性有機質土を建設材料として有効に利用する目的で安定処理を行ない、その強度特性を調べた。対象とした有機質土は、平均含水比 $w=260\%$ 、有機物含有量 $Lig=45\%$ の腐植土である。これに(1)生石灰、(2)セメント、(3)セメント+石膏(助剤)、(4)普通土(川砂、山砂、関東ローム)を加え、その混合率、養生期間を種々変化させたものについて一軸圧縮、三軸圧縮(UU試験)、含水比、pH、X線分析など一連の土質試験を実施した。

その結果、(i)生石灰、セメント単独混合は含水比低下には寄与するが、強度発現にはさほど効果を示さない。(ii)セメント+石膏混合は強度発現に及ぼす石膏の助剤としての効果が大きい、(iii)また、その混合割合には最適混合率がある、(iv)混合用砂としての川砂と山砂の強度増加に及ぼす影響は山砂の方が大きい、ことなどが判明した。

1. まえがき

有機質土を多く含んだ地域で建設工事を行う場合、その土性がきわめて悪いために非常な困難を伴うことはよく知られている事実である。特に、有機質土の掘削残土の処分については、これまで無処理のまま投棄処分することがほとんどであった。しかし、最近のように国土開

発が進むとこのような有機質土地盤に遭遇する機会も次第に増加し、捨土場所の確保や環境問題などの点からも掘削残土を埋戻し材あるいは盛土材などの建設材料として利用するための適切な処理・処分方法の検討が望まれるようになった。

そこで、筆者らは有機質土の安定処理を目的として平均含水比 $w=260\%$ 、有機物含水量 $Lig=45\%$ の典型的

な腐植土試料に(1)生石灰, (2)セメント, (3)セメント+石膏(助剤), (4)普通土(川砂, 山砂, 関東ローム)を添加した安定処理実験を実施した。一般に, 有機物の少ない土を石灰およびセメントで安定処理することは, 従来からソイルライム工法, ソイルセメント工法として実施されている。しかし, これらの工法を有機物の多い有機質土に適用するという考えは, 有機質土の高含水性に加え, 有機物がセメントおよび石灰中のカルシウムイオンと結びついて水和反応などを阻害するため妥当ではないといわれている¹⁾。それにもかかわらず, あえて今回の実験において, 安定処理材の主材として石灰, セメントを選んだのは, (1)安定処理混合材として安価であり, 最も実用的であること, (2)実際にこのような泥炭性有機質土に適用した例に乏しいこと, (3)セメントのみでは固化困難な有機質ヘドロでも, セメントに助剤として石膏を併用すれば強度が著しく増大する²⁾こと, などを考慮したことによる。また, 普通土の混合は, 不足粒度を補うことにより締固め度を高め, 同時に粘着力, 内部マサツ角を増加させる効果などを期待している。

2. 試料と試験方法

2.1. 試験に用いた試料

試料の土性を表-1に示す。対象とした有機質土は茨城県鹿島町より採取した腐植土であり, 自然含水比は $\omega=200\% \sim 400\%$ を越すものまで比較的広い範囲に分布している。これを大型ミキサーで十分混練りした後の平均含水比は $\omega=260 \pm 5\%$, また有機物含有量 $Lig=45 \pm 0.5\%$ であり, ほぼ均一な試料と考えられる。

混合材としての川砂, 山砂は2m/mフルイを通し, 一定重量になるまで40°Cで炉乾燥させたものであり, 関東ロームは当研究所内で採取した含水比 $\omega=113\%$ の自然試料である。

また, 添加材は次に示すものを使用した。

- 生石灰……小野田セメント K.K. 製ケミコライム

土 性	対象土	混 合 土		
	腐植土 (茨城県鹿島町)	川 砂 (利根川)	山 砂 (群馬県桐生)	関東ローム (都 清 瀬)
比 重 G_s	2.070	2.655	2.655	2.640
含 水 比 $W(\%)$	200~400 平均260	0.3	0.7	113
PH (H_2O)	6.6	8.0	5.8	7.0
有機物含有量(%)	45.0	1.4	2.4	21.0
透水係数(攪乱土) $k(cm/sec)$	5×10^{-7}	2×10^{-3}	2×10^{-3}	2×10^{-5}
粒 砂 分(%)	31.0	97.5	88.0	58.9
	シルト分(%)	31.0	1.6	7.5
度 粘 土 分(%)	38.0	0.9	4.5	22.0

表-1 混合土の種類と土性

- セメント……同社製普通ポルトランドセメント
- 石膏……吉野石膏 K.K. 製半水石膏

2.2. 試験方法

2.2.1. 混合率 各混合材および添加材の混合率は, 経験的混合率および現場施工時の経済性を考慮して表-2のように定めた。ここで, 混合率はすべて腐植土の調整試料に対する重量比で表わしている。

2.2.2. 供試体作製方法 供試体の作製は, 直径5cm, 高さ12.5cmの鋼製モールドを使用し, 「締固めて作る安定処理土の締固めおよび一軸圧縮試験方法」³⁾(土質工学会 JIS 原案)を参考にして土質試験法に定める第一法エネルギー ($E_0=5.6 cm \cdot kg/cm^3$)で締固めた。

2.2.3. 養生方法と養生期間 作製した供試体は, 養生中の膨張を防

ぐため鉄板で蓋をし, ビニールで完全密封した上, 温度30°C, 相対湿度90%以上に保った恒温恒湿箱で表-2に示した所定の期間養生を行った。写真-1にその養生状況を示す。

	混合材の種類	混合率(%)	養生期間(日)
混生 系 石 灰	生 石 灰	3, 6, 10, (20)	3, 7, 14, 28
	川 砂	0, 50, 100	
混セ 系 メ ン ト	普通ポルトランドセメント	3, 6, 10, (20)	(1), 3, 7, 14, 28
	川 砂	0, 50, 100	
セ メ ン ト ・ 石 膏 混 合 系	普通ポルトランドセメント	6, 7, 8, 9, 9.5, 10	(1), 3, 7, 14, 28
	石 膏	4, 3, 2, 1, 0.5, 0	
	川 砂	(10), (30), 50	
	山 砂	(30), 50	
普 通 土 混 合 系	川 砂	50, 100, 200, 300	3
	山 砂	50, 100, 200, 300	
	関東ローム	50, 100, 200, 300	

()内は一部未実施

表-2 各混合材の混合率と養生期間

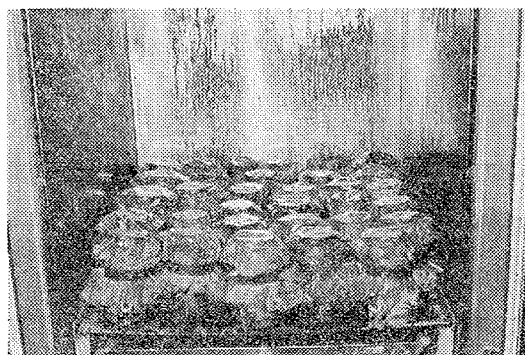


写真-1 鋼製モールドと養生状況

2.2.4. 処理土の性状試験 安定処理土の性状を調べるために, 力学特性として一軸圧縮試験, 三軸圧縮試験(UU), また物理特性として含水比, 単位体積重量, 粒度などの試験を行った。さらに, 処理土の pH 測定, X線分析によって反応生成鉱物を調べ化学的特性も検討した。

3. 実験結果と考察

3.1. 物理特性

3.1.1. 含水比 図-1は普通土の混合率と含水比の関係を川砂と関東ロームについて示したものである。混合率の増加に伴い含水比は低下するが、その関係は双曲線状となり、混合率50%以上では混合率50%までに比べて含水比低下の効果が急減している。川砂と関東ロームの差は川砂が乾燥試料 ($\omega=0.3\%$)を使用しているのに対し

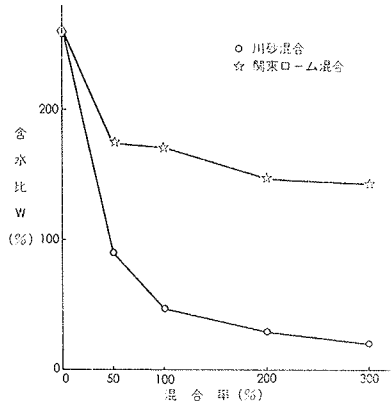


図-1 普通土の混合率と含水比の関係

て、関東ロームは自然土 ($\omega=113\%$)を使用しているためである。

次に、図-2に各添加材の混合率と含水比の関係を示す。図から明らかなように、生石灰およびセメント混合の場合、混合率の増加とともに含水比は減少し、初期含水比 $\omega=260\%$ のもの混合率20%では $\omega=140\%$ 程度まで減少する。その低下割合はほぼ同じであり、この実験においては生石灰の発熱効果による含水比低下は明確ではない。また、セメント+石膏混合の含水比については図中に10%混合率のみを示しているが、生石灰単独混合、セメント単独混合の場合とほぼ同一値となっている。なお、図には示していないが、添加材混合による含水比低下は理論値(計算値)と測定値を比較してもほとんど差異はなかった。

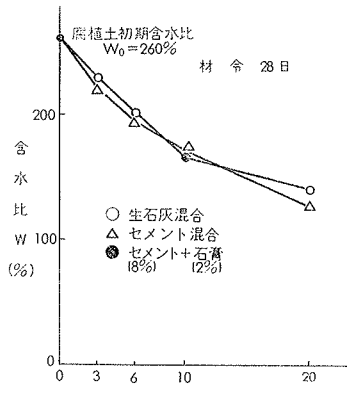


図-2 添加材の混合率と含水比の関係

3.1.2. 単位体積重量 図-3は砂あるいは関東ロームの混合率と単位体積重量の関係を示したものである。関東ロームの場合、自然状態の湿潤密度は $\gamma_t=1.3\sim 1.45\text{ g/cm}^3$ 程度と考えられる⁴⁾ので、当初から予想されたことではあるが、混合率を300%にとっても腐植土に対してはそれほど密度増大につながらないことがわかる。一方、腐植土に川砂あるいは山砂を混合した場合、混合率50%で $\gamma_t=1.4\text{ g/cm}^3$ 、100%で $\gamma_t=1.6\text{ g/cm}^3$ 、200%で $\gamma_t=1.75\text{ g/cm}^3$ 、300%で $\gamma_t=1.85\text{ g/cm}^3$ と混合率の増加に伴い単位体積重量も増加しており、両者の有意差

は見い出せない。なお、生石灰、セメント、セメント+石膏混合(いずれも川砂を併用)による単位体積重量の増加は先の川砂、山砂混合の場合と同程度である。

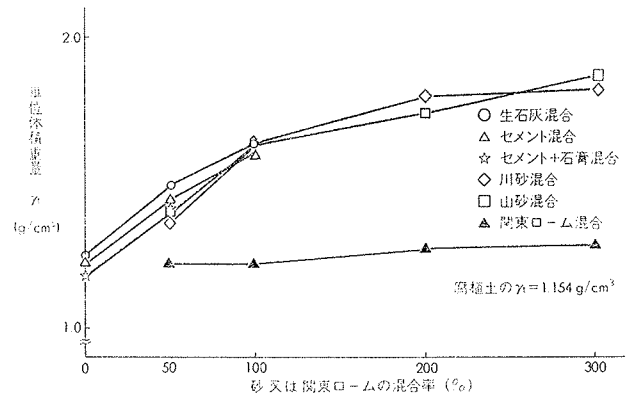


図-3 混合率と単位体積重量の関係

3.2. 力学特性

3.2.1. 粘着力 図-4は普通土の混合率と粘着力の関係を示したものである。混合率の増加に伴い粘着力は若干増加する傾向がみられるが、混合率100%程度までは無混合の場合とそれほど大差ない。

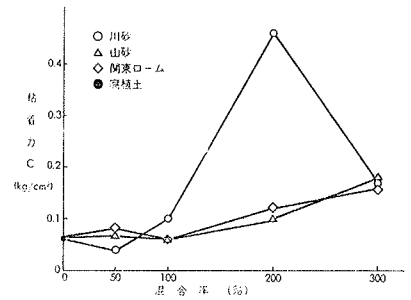


図-4 普通土の混合率と粘着力の関係

図-5は生石灰、セメントの混合率と粘着力の関係、およびセメント+石膏における両者の比と粘着力の関係を材令28日の値で示したものである。生石灰混合の場合、混合率が增大しても強度増加はほんの僅かである。セメント混合の場合は生石灰混合よりも強度増加を望めるが、混合率10%まではさほど強度発現せず、15%、20%といった高混合率

に対してはそれほど強度増大につながらないことがわかる。一方、腐植土に川砂あるいは山砂を混合した場合、混合率50%で $\gamma_t=1.4\text{ g/cm}^3$ 、100%で $\gamma_t=1.6\text{ g/cm}^3$ 、200%で $\gamma_t=1.75\text{ g/cm}^3$ 、300%で $\gamma_t=1.85\text{ g/cm}^3$ と混合率の増加に伴い単位体積重量も増加しており、両者の有意差

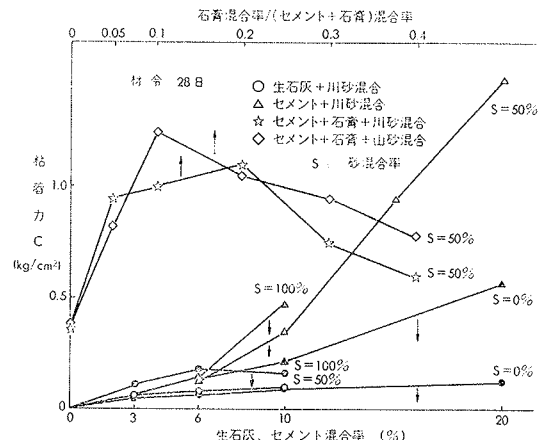


図-5 添加材の混合率と粘着力の関係

になると砂混合の効果も加わってかなりの強度増加を示す。セメント+石膏混合の場合、その合計混合率を10%に定めているが、他の混合材に比べて著しい強度増加を示している。すなわち、混合率10%（川砂混合率50%）の場合、セメント単独混合では粘着力 $C=0.35\text{kg/cm}^2$ に対して、セメント+石膏混合では $C=1.1\text{kg/cm}^2$ と実に3倍強の強度発現を示している。このことは、ひとえに石膏の助剤としての効果が大きいことを示している。また、図から粘着力 $C=1.1\text{kg/cm}^2$ を出すために必要な混合率はセメント単独の場合16%であるのに対して、セメント+石膏の場合10%である。セメント+石膏混合ではセメント8%と石膏2%の計10%であるから約半分のセメント量に助剤として若干の石膏を添加するだけで著しい強度増加が期待でき、しかも経済的であることを示している。なお、図からわかるように、この石膏の助剤としての混合率には喜田ら²⁾も述べているように最適混合率が存在し、今回の場合石膏/(セメント+石膏)の最適比率は0.05~0.2であり、この範囲外ではむしろ強度低下をきたすことがわかった。

3.2.2. 内部マサツ角 図-6は普通土の混合率と内部マサツ角の関係を示したものである。粘土分を22%も含む関東ロームは別として、砂混合に伴う内部マサツ角は混合率100%程度以上になると著しく大きくなり、たとえば混合率300%にもなると内部マサツ角は $\phi=30^\circ$ 前後まで増加する。このことは前述の粘着力の増加傾向と類似している。

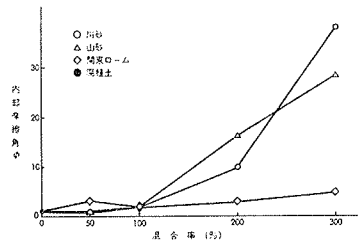


図-6 普通土の混合率と内部マサツ角の関係

図-7は各添加材の混合率と内部マサツ角の関係を材

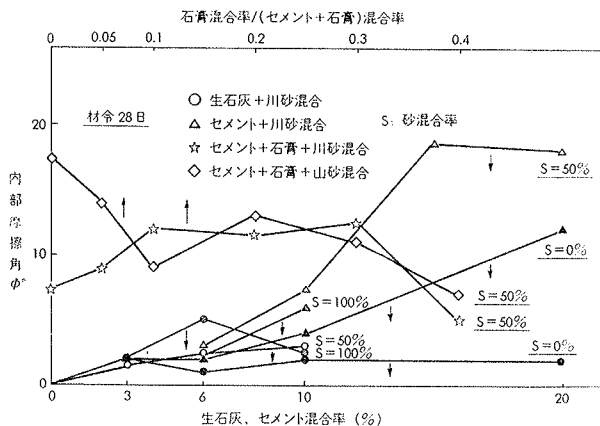


図-7 添加材の混合率と内部マサツ角の関係

令28日の値で示したものである。図-5の結果と同様に石膏の助剤としての効果が内部マサツ角においても認められる。しかし、セメント+石膏混合率10%では砂混合率50%でも $\phi=12^\circ$ 程度であり、せん断強度に与える内部マサツ角の影響は粘着力成分に比べて小さい。

3.2.3. 一軸圧縮強度 図-8は普通土の混合率と一軸圧縮強度の関係を示したものである。関東ローム混合による強度増加は僅かである。また、砂混合の場合、川砂と山砂の差は明瞭でなく、両者とも混合率300%にもなると一軸圧縮強度で $q_u=1.0\sim 1.5\text{kg/cm}^2$ 程度になる。しかし、この値は図-6の結果からもわかるように、大部分が砂で置き換えた効果、すなわち内部マサツ角の増加による強度増加であり、対象土との量的な比較からすれば実用的ではない。

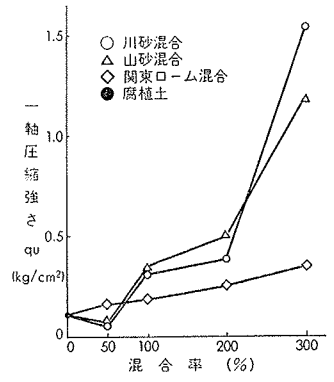


図-8 普通土の混合率と一軸圧縮強度の関係

図-9はセメント+石膏と川砂あるいは山砂を混合した試料の材令と一軸圧縮強度の関係を調べたものである。川砂、山砂混合の両者とも材令の経過とともに強度は増加するが、材令7日以降では山砂の方が川砂に比べて強度増加が大きい。また、図は石膏添加の助剤としての効果が非常に大きく、これに砂も混入すると、さらに大きな強度増加が期待できることも示している。

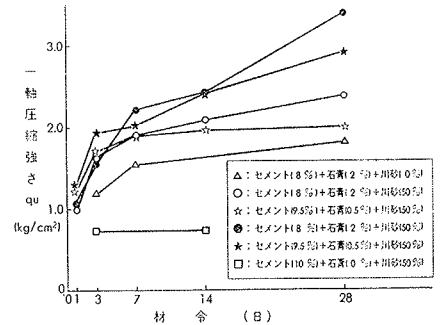


図-9 砂の違いによる材令と一軸圧縮強度の関係

3.3. X線回折による検討

図-10は腐植土試料に川砂50%、セメント8%、石膏2%を混合した時の処理土について、材令3日、7日、28日、72日後の生成鉱物をX線分析により同定したものである。供試した腐植土には粘土鉱物は認められず、一次鉱物として石英、長石類が認められただけであり、川砂には粘土鉱物として雲母類とイライト、カオリンなどが認められ、一次鉱物として石英、長石類が認められた。材令に伴う生成物は以下のようなものである。

(i) 材令3日…… CaCO_3 (炭酸カルシウム) と石膏の水和生成物である $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ が認め

られる。

(ii) 材令7日……セメントに由来すると考えられる $C_2SH(2CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O)$ などが認められる。

(iii) 材令28日……ケイ酸カルシウム ($CaSiO_2$) 水和物を主とする多数の回折線が認められる。

(iv) 材令72日……ケイ酸カルシウム水和物のうち、長期材令にて生成する C_2SH のシャープな回折線が認められ、結晶化の進んでいることがうかがわれる。

土の種類	鉱物	粘土鉱物	1次鉱物
腐植土		認められず	石英, 長石類
山砂		モンモリロナイト 加水ハロイサイト メタハロイサイト	石英, 長石類
川砂		雲母類 イライト カオリン	石英, 長石類

表-3 各混合土の鉱物組成の相違

さらに、腐植土、山砂混合試料に対するセメント+石膏安定処理土のX線分析も行ったが、川砂と山砂の生成鉱物はほとんど類似しており、両者の違いは特に認められなかった。それにもかかわらず、山砂混合の方が川砂混合よりも強度増加大となるのは表-3に示すように、含有する粘土鉱物の相違によるものが一因と考えられる。すなわち、これはあくまでも推定の域を出ないが、山砂で効果が大きかった理由の1つはセメントに含まれるカルシウムイオンなどと山砂に含まれる粘土鉱物の種類および量的な反応条件がうまく適合したためではないかと推測している。

4. まとめ

以上、腐植土試料に(i)生石灰、(ii)セメント、(iii)セメント+石膏、(iv)普通土(川砂、山砂、関東ローム)を混合した場合の安定処理実験を行い、処理土の強度特性を中心に考察した。この実験研究で得られた結果をまとめて再掲すると次のようである。

(i) 生石灰、セメント単独混合では含水比低下には寄与するが、強度発現にはさほど効果がない。

(ii) セメント+石膏混合では強度発現に及ぼす石膏の助剤としての効果が非常に大きい。

(iii) また、その際セメントに対する石膏の混合率には最適混合率がある。

(iv) 混合用砂としての川砂と山砂の強度増加に及ぼす影響は山砂の方が大となる。この要因は含まれる粘土

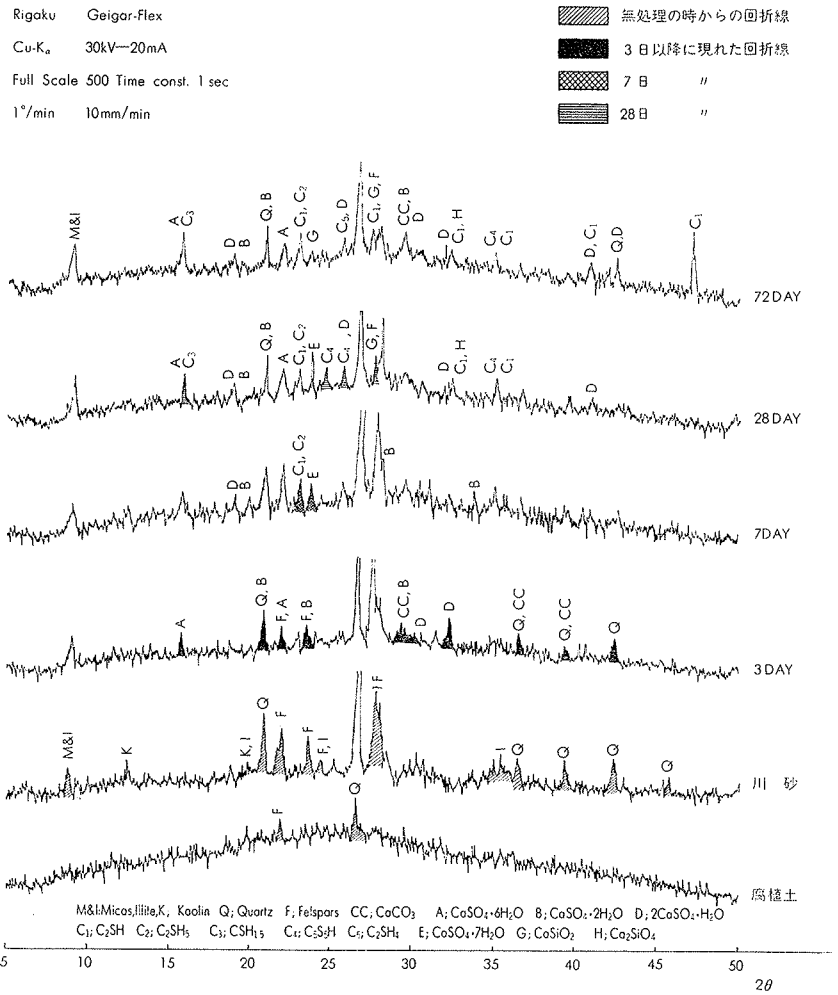


図-10 処理土(腐植土100%, 川砂50%, セメント8%, 石膏2%)のX線回折分析結果

鉱物の種類と量的な反応条件などが影響したためと思われる。

5. あとがき

有機質土(特に腐植土)を安定処理し、将来建設材料として有効利用する場合、セメント+石膏(助剤)および砂混合による安定処理法にその糸口が見い出せそうであるが、適正混合率、圧縮性、長期安定性なども含めて強度発現機構に関する不明な点も数多く残されている。これらについては、現在鋭意研究継続中であり、別の機会に報告したいと考えている。

参考文献

- 1) 三木, 山内: 土質安定の理論と実際, オーム社, (1959), p. 93
- 2) 喜田 他: 汚泥の固化処理に関する研究(第5報), 大林組技術研究所報, No. 14, (1977), pp. 114~118
- 3) 土質試験法: 土質工学会, (1969), pp. 575~585
- 4) 日本特殊土: 土質工学会, (1974), pp. 50~51