

ソイルセメントの固化特性と品質管理に関する研究 (その1)

——ソイルセメント壁における沖積粘土・関東ローム・砂の室内固化特性——

喜田大三 久保博

Studies on Hardening Properties and Quality Control of Soil-Cements (Part 1)

——Hardening Properties in the Laboratory of Alluvial Soil,
Volcanic Cohesive Soil, and Sand Mixed with Cement for Soil-Cement Walls——

Daizo Kita Hiroshi Kubo

Abstract

Deep soil-cements are made by mixing cement-type solidificants in ground and are used in various arrangements for sheathing, water cut-off walls or soil stabilization. In this paper, the authors discuss the hardening properties of soil-cement with bentonite for sheathing and water cut-off walls. As solidificants, ordinary portland cement (C), slag (S), gypsum (G), and slaked lime (L) were used in slurry of which water-solidificant ratios were 1.5.

(1) Although strengths of hardened C+S were higher than those of hardened C, the former were lower than the latter on mixing with alluvial and volcanic cohesive soils. Strengths of alluvial soil, volcanic cohesive soil, and sand hardened by C+S+G+L were higher than C.

(2) Through pF-water, lime absorption, and X-ray diffraction tests, it was surmised that sand hardened with a small amount of C because of little free-lime loss by absorption and pozzolanic reaction, and C+S+G+L gave high strengths to all of the soils due to production of ettringite.

概 要

深層ソイルセメントは、地盤にセメント系固化材を混合して造成し、各種形状に接合し山留め・遮水壁用あるいは地盤改良用として用いられる。本報では、一般にベントナイトを併用する山留め・遮水壁用ソイルセメントの固化特性を調査した。固化材として、普通ポルトランドセメント (C)、スラグ (S)、2水石膏 (G)、消石灰 (L) を水/固定材比1.5で用いた。

(1) 固定材ミルクの強度は、C+SがCよりも大きいのが、沖積粘土や関東ロームに混合した強度は、CがC+Sよりも大きかった。また、C+S+G+Lは、沖積粘土、関東ローム、砂に対して、Cよりも大きな強度を発現した。

(2) pF水分試験、石灰消費量試験、X線回折によって、砂は吸着やポゾラン反応による石灰の消費が少ないため、他の土に比べて少量のCでも固化すること、C+S+G+Lはいずれの土砂でも多量のエトリンジャイト生成が強度増大を促していることなどが推察された。

1. まえがき

ソイルセメント工法は、対象土（陸上土と海底土、また汚泥を含む）の位置、セメントとの混合機械によって、①対象土を固定式ミキサーまで搬入し混合する工法、②機械が移動して表層・浅層（約0.2m～4mまで）の土を混合する工法、③機械が移動して深層（約4m～40mまで）の土を混合する工法に分類できる。本研究は、これらの工法におけるソイルセメントの固化特性を究明し、

品質管理法を確立することを目的とする。

さて、前記③の工法では、深層ソイルセメント固化体を造成する。同工法は、高強度に改良でき、置換工法に比べて省資源になり、処分土量も大幅に低減できる。さらに、同工法は、近年、機械の発達によって施工深度、混合精度、杭の接合精度、施工能率が著しく向上し、適用範囲が拡大している。このような深層ソイルセメントは、表一1のように「山留め・遮水壁造成用」と「地盤改良用」に分類できる。前者は、遮水のため一般にベン

	山留め・遮水壁造成用	地盤改良用
目的	親杭(H形鋼)間部の遮水, 強度増大	支持力増大, 沈下防止, すべり防止
対象土	陸上土	海底土, 陸上土
改良形状	壁状 (厚約0.5m, 深6~25m)	杭状, 壁状, 格子状, ブロック状(深6~40m)
施工機械の攪拌部	羽根径約0.5m 一般に3~4軸	羽根径一般に約1m。 一般に1~2軸(4.8軸もある)
添加材料	普通ポルトランドセメント, 高炉セメントなど。水/固化材≒1.5~2.5。遮水のため一般にベントナイト併用。	普通ポルトランドセメント, 高炉セメントなど。水/固化材≒0.6~1.5
ソイルセメント杭中の鋼材挿入	親杭としてのH形鋼挿入	一般に挿入しない
目標強度(現場)	qu5~15kgf/cm ² 程度	陸上:qu2~10kgf/cm ² 程度 海底:qu20~50 "

表-1 深層ソイルセメントの分類と特徴

トナイトを併用し, また混合後に鋼材を挿入するので, 後者に比べて水/固化材比の高い固化材ミルクを用いる。当社には, 地盤改良用としてOval-DM工法¹⁾, 山留め・遮水壁用として簡易地中連続壁工法(仮称)がある。本報では, 山留め・遮水用ソイルセメント壁を対象として, 3種類の土砂の固化特性を室内試験で調査した。

2. 供試材料と試験方法

2.1. 土砂

表-2に示す沖積粘土(東京都千代田区), 関東ローム(東京都清瀬市), 砂(千葉県木更津市)を用いた。

2.2. 固化材

下記の材料を単独あるいは配合して用いた。

①普通ポルトランドセメント(以下, セメント), ②高炉水滓スラグ(以下, スラグ), ③二水石膏(以下, 石膏), ④消石灰(以下, 石灰)。なお, 各固化材において, ベントナイト(共立, 250#)を併用した。

2.3. 固化強度の試験

固化剤とベントナイトをミルク状(一部, 粉状)で土砂に添加し, 土質工学会基準案²⁾に準じて供試体を作製し, 20℃恒温室で養生し, 一軸圧縮試験を実施した。

2.4. pF水分および石灰吸着量試験

pF水分は, 日立高速冷却遠心機を用いて, 遠心分離法で測定した。また, 石灰吸着量は, 土砂に0.07%水酸化カルシウム溶液を加え, 流動パラフィンで被覆し炭酸化を防止して攪拌し, そのpH測定によって求めた。

3. 各種配合の固化材による土砂の固化強度

3.1. 固化材ミルクのスラグ/セメント比と強度の関係

固化材は, セメント単独で用いられる場合と, セメントとスラグを配合して用いられる場合(高炉セメントを含む)がある。図-1は, 固化材ミルク(水/固化材=

供試土	含水比 (%)	比重	粒度分布			コンシステンシ		湿潤密度 (t/m ³)	主な粘土鉱物
			粘土 (%)	シルト (%)	砂 (%)	wL (%)	wP (%)		
沖積粘土	46	2.61	40	36	24	52	22	1.65	カリナイト イライト
関東ローム	133	2.69	47	48	5	153	72	1.28	アロフェン
砂	10	2.63	—	5	95	—	—	1.92	—

表-2 供試土の性状

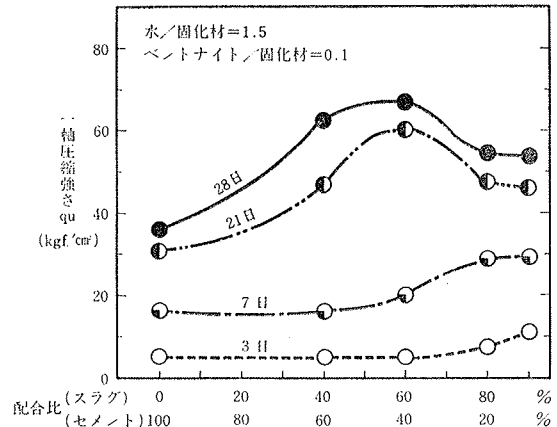


図-1 固化材ミルクのスラグ/セメント比と強度の関係

1.5, ベントナイト/固化材=0.1)のスラグ/セメント比と強度の関係を示す。

強度は, 短期ではスラグ含有量80~90%において, また長期ではスラグ含有量40~60%において最大になった。これらは, 水-ベントナイト-セメント-スラグ系の複雑な反応によっており, その機構は明らかでない。

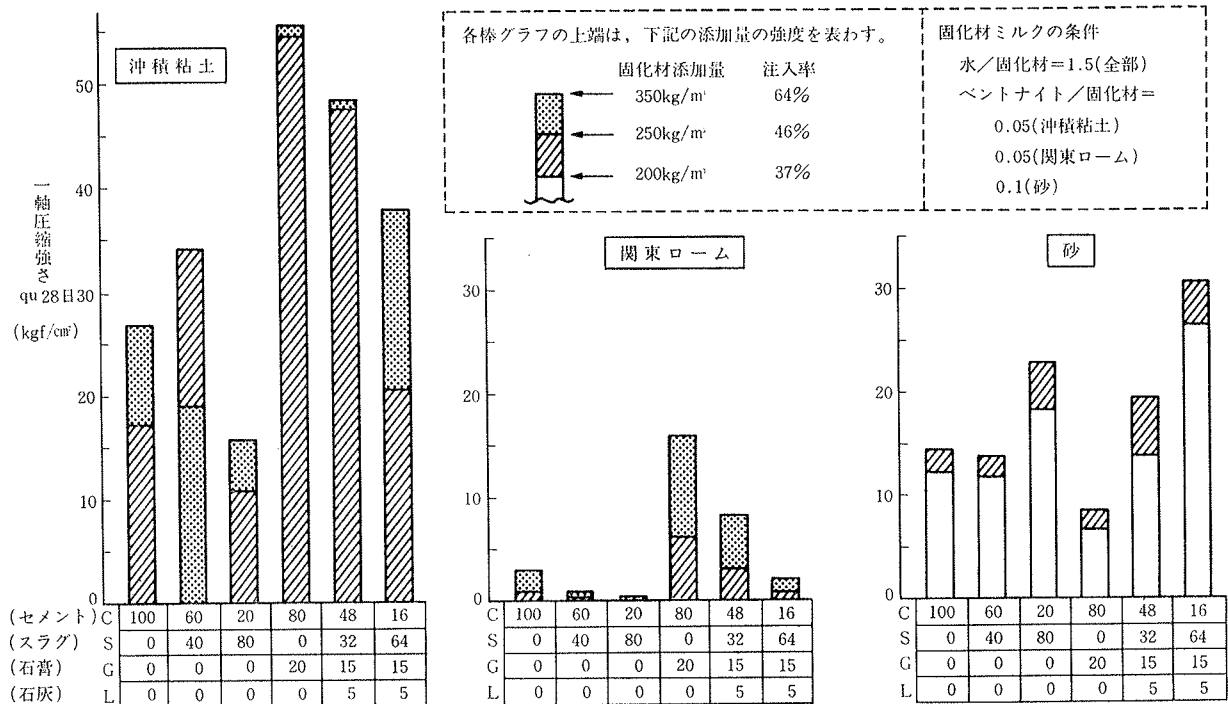
3.2. スラグ・セメント・石膏・石灰の配合比と土砂固化強度の関係

各材料の配合比の異なる6種固化材による土砂の強度を図-2に示す。固化材ミルクの水/固化材比は1.5, ベントナイト/固化材比は砂で0.1, その他で0.05とした。

固化強度は, 大部分において沖積粘土>>砂>関東ロームの順であった。また, 「セメント+スラグ」では, スラグを80%まで混合しても, 砂の強度は低下しないけれども, 沖積粘土および関東ロームの強度は低下した。従って, 粘性土に対して, スラグを多量含む固化材を使用する場合, 注意する必要がある。

つぎに, 「セメント+石膏(80:20)」は, セメント単独に比べて, 沖積粘土の強度を2~3倍, 関東ロームの強度を5~6倍に増大させた。しかし, 砂の強度を約0.6倍に減少させた。

また, 「セメント+スラグ+石膏+石灰」は, 48:32:15:5の配合, 16:64:15:5の配合ともに, セメント単独に比べて, いずれの土砂でも強度を増大させた。



図一 各種配合の固化材による土砂の強度

3.3. 固化材添加量と強度の関係

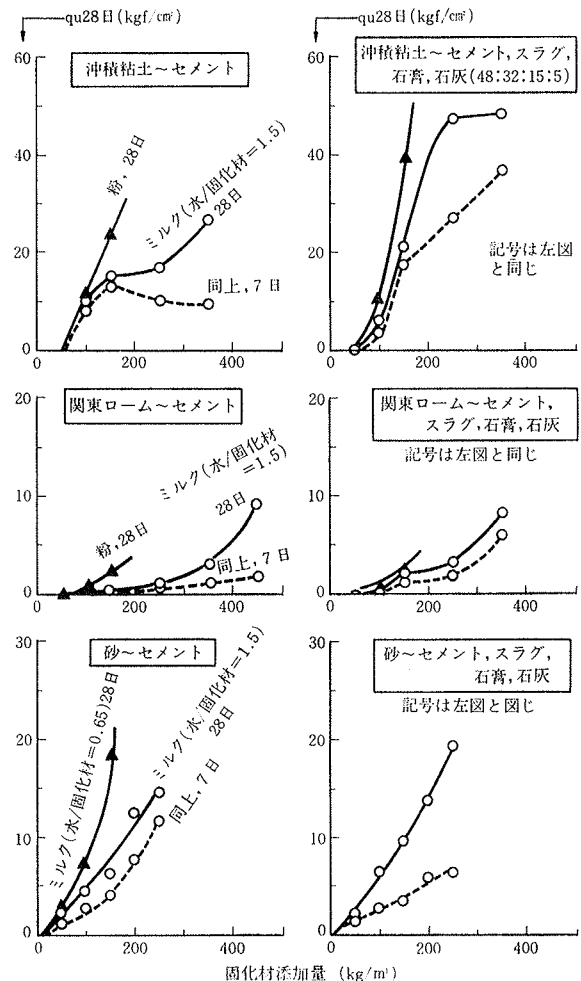
固化材添加量と強度の関係を図一3に示す。固化材として、セメントと、図一2でいずれの土砂にも高い強度を与えた「セメント+スラグ+石膏+石灰 (48:32:15:5)」の2種類を用いた。固化材ミルクの水/固化材比は、沖積粘土および関東ロームで1.5と0(粉状)、砂で1.5と0.65とし、またベントナイト/固化材比は、沖積粘土および関東ロームで0.05、砂で0.1とした。

セメントによる強度は、砂の場合および沖積粘土に粉状で添加した場合、添加量とともに大きく増大した。しかし、沖積粘土にセメントを水/固化材=1.5で添加した場合、添加量に伴う強度増大は、やや鈍化した。また、関東ロームでは、粉状添加あるいはミルク状 350 kg/m³まで強度が小さく、450 kg/m³で大きな強度になった。

一方、「セメント+スラグ+石膏+石灰」による強度は、水/固化材=1.5のミルクで添加しても、粉状で添加した場合と類似の大きな強度を発現した。そして、両者の強度の差は、セメントの場合に比べて小さかった。当配合の固化材は、このように固化材ミルクの水/固化材比の影響が少なく、添加量に伴う強度増大も著しい。

3.4. 固化材混合初期のソイルセメントの流動性

山留め・遮水壁用のソイルセメント壁を施工する際、一般に固化材ミルクを混合した後にH形鋼を挿入し、その挿入はH形鋼の自重貫入を原則としている。従って、H形鋼挿入時までのソイルセメントは、できるだけ流動状であることが要望される。



図一3 粉状、ミルク状の固化材の添加量と強度の関係

ここでは、ソイルセメントの流動性をフォールコーン試験機によって測定した。結果の一例として、セメントを水/固化材=1.5のミルクで添加した場合を図-4に示す。

流動性は、関東ローム≧砂≧粘性土の順であった。そして、流動性は、固化材ミルクの添加量とともに増大し、時間経過によって減少した。いま、30分後におけるコーン貫入量 10 mm を一応の判定基準にすると、関東ロームでは 330 kg/m³、砂では 250 kg/m³ が必要である。また、沖積粘土では 350 kg/m³ でも流動性が得られず、固化材ミルクの水/固化材比を増大させる必要性が示唆される。山留め・遮水壁用ソイルセメントの固化材ミルクの水/固化材比と添加量は、このような流動性と前述の固化強度によって決定されよう。しかし、現場と室内では、混合状態や養生条件がかなり異なるので、両者の対応関係について今後さらに調査する。

4. 固化強度の土質化学的検討

4.1. pF 水分試験

ソイルセメントの強度に關与する重要な因子の一つとして、ソイルセメント作製時の“pF 3 分離水量/固化材比”（以下、 $W_{<pF3}/C$ 比と表わす）があることを筆者ら³⁾は認めている。供試土の pF~含水比曲線を図-5に示す。この結果から、各供試土 1 m³ 中に含まれる pF 3 分離水量を計算すると、沖積粘土で 45 l、関東ロームで 126 l、砂で 104 l となる。これに、同図に示すベントナイトによる水分吸着量（pF 3 非分離水量）も考慮して、 $W_{<pF3}/C$ 比を算出した。 $W_{<pF3}/C$ 比と強度の関係を図-6に示す。

セメントをミルク状で混合した場合、 $W_{<pF3}/C$ 比が約 1.6 では 3 種の土砂の強度は類似したが、それ以上の同比では砂≧沖積粘土≧関東ロームの順であった。一方、「セメント+スラグ+石膏+石灰」をミルク状で添加した場合、 $W_{<pF3}/C$ 比が 1.8~1.9 で沖積粘土と関東ロ

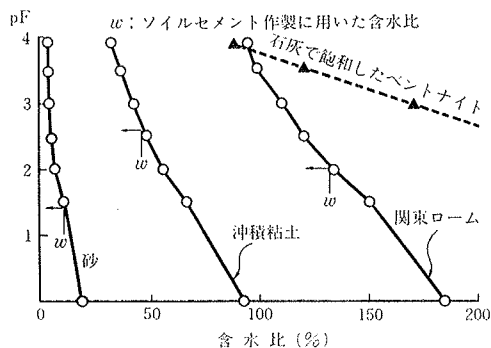


図-5 供試土の pF~含水比曲線

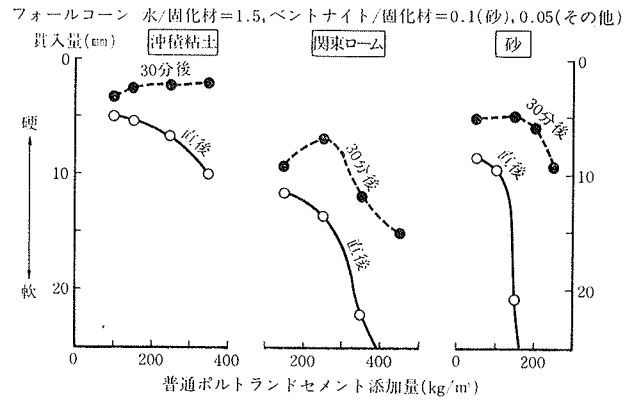


図-4 固化材ミルク混合初期のソイルセメントの流動性

ムの強度は類似し、それ以上の同比では砂≧関東ローム≧沖積粘土の順であった。

これらのことから、3種類の土砂の強度差は $W_{<pF3}/C$ 比、すなわち水分量の影響のみで説明できないこと、また「セメント+スラグ+石膏+石灰」は、セメントと反対で、同一水分条件において沖積粘土よりも関東ロームの強度を大きくする傾向があることを認めた。

また、固化材を粉状で混合すると、 $W_{<pF3}/C$ 比が低いにもかかわらず、強度があまり増大しなかった原因として、固化材が十分に水和反応しなかったこと、混合状態が劣ったことなど考えられる。

4.2. 石灰消費量試験

ソイルセメントの強度は、主に、セメント水和鉱物の強度と、セメントからの遊離石灰と土粒子とのポズラン反応鉱物の強度によると考えられる。そこで、各土砂の

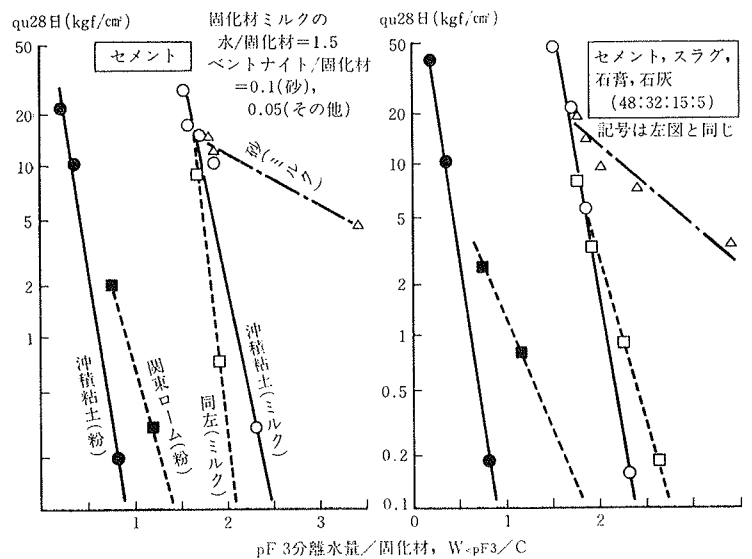
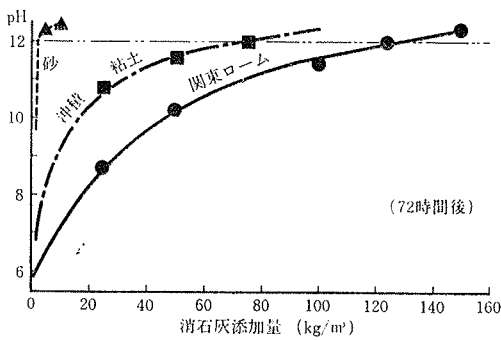


図-6 ソイルセメント作製時の pF3 分離水量/固化材比と強度の関係



図一7 消石灰添加量～pH 曲線

セメント添加量と強度の関係について、浅川ら⁴⁾による石灰吸着量試験を応用して検討した。結果を図一7に示す。

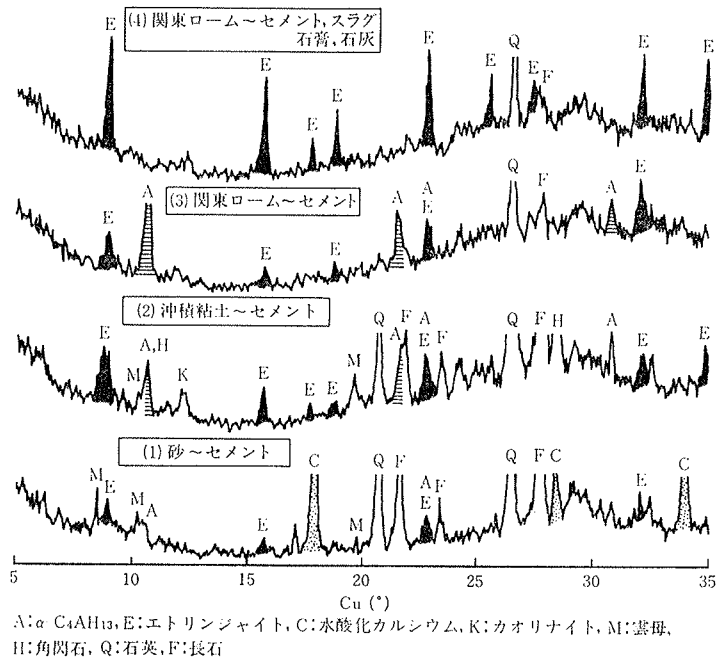
石灰溶液の pH は、約12.4である。従って、pH が12.4以下になる添加量では、土粒子の吸着とポズラン反応のため石灰が消費され、遊離石灰の濃度が低下したことを意味する。勿論、ポズラン反応は、長期間継続するので、ここでの測定はその一部にすぎない。石灰の土粒子への吸着量、ポズラン反応の量、またセメント水和反応が十分に行なわれる所要 pH について不明であるが、いま pH 12 を得る石灰添加量を図一7 から求めると、砂で 2 kg/m³、沖積粘土で 70 kg/m³、関東ロームで 130 kg/m³ であった。同値が関東ロームで大きいのは、アロフェンを多量含むためである。

セメントと消石灰では、遊離石灰量が異なり、またセメントには水和反応による強度増大もあるので、上記結果とセメント添加量～強度の関係を単純に対比できない。しかし、図一3で、沖積粘土に 50 kg/m³、関東ロームに 100 kg/m³ のセメントでほとんど固化しなかったこと、砂では 50 kg/m³ でも十分に固化したことから、強度に対して石灰消費量がかなり影響したと推察される。

4.3. X線回折

結果を図一8に示す。図中の(1)～(4)は、水/固化材比 1.5 のミルクで固化材を 250 kg/m³ (砂)あるいは 350 kg/m³ (砂以外)混合しており、材令28日である。

セメントによって固化した場合、沖積粘土と関東ロームでは、アルミ酸カルシウム (α -C₄AH₁₃) とエトリンジャイト (3CaO・Al₂O₃・3CaSO₄・32H₂O) のピークが同程度現われた。これらの生成鉱物が強度に寄与したとすれば、沖積粘土と関東ロームの強度は類似することになる。しかし、図一2のように、この場合の強度は、沖積粘土 27 kgf/cm²、関東ローム 3 kgf/cm² であった。従って、両者の強度差は、X線回折図上の生成鉱物のみでは説明できず、土粒子の集合体“団粒”の強度なども関与すると考える。また、砂では他でみられない水酸化カルシウ



図一8 ソイルセメントのX線回折図

ムのピークが大きく現われた。水酸化カルシウムの生成が強度に及ぼす影響については、不明である。

一方、「セメント+スラグ+石膏+石灰」の場合、図中の(4)のように、エトリンジャイトが良好に生成し、他の生成鉱物は認められなかった。このことは、関東ローム以外でも同様であった。従って、この固化材による強度増大には、エトリンジャイトの寄与が大きいと考える。

5. あとがき

山留め・遮水壁のソイルセメントを対象とした沖積粘土、関東ローム、砂の基本的な固化特性がかなり明瞭になった。今後、現場のソイルセメントの調査も併せて行ない、現場と室内を対比させながら、その品質と固化特性について、さらに調査する予定である。

参考文献

- 1) 西林, 松尾, 細谷, 杉江, 小日向: 深層混合処理工法について(その6), 大林組技術研究所報, No. 28, (1984), pp. 89~93
- 2) 土質工学会基準案「締固めを伴わない安定処理土の試験方法」: 土と基礎, Vol. 30, No. 1, (1982), pp. 95~97
- 3) 喜田, 久保, 炭田: 汚泥の処理処分に関する研究(第3報), 大林組技術研究所報, No. 14, (1977), pp. 104~108
- 4) 浅川, 渡辺: 石灰安定処理における配合試験法試案, 第13回土質工学研究発表会講演集, (1978), pp. 665~668