

# 汚泥の処理処分に関する研究 (第11報)

—ヘドロ(底質)の固化処理システムと各種固化剤の比較—

喜田大三 辻博和  
久保博 漆原知則

## Studies on Treatment and Disposal of Mud (Part 11)

—Solidification Treatment System of Bottom Sediments and its Solidifiers—

Daizo Kita Hirokazu Tsuji  
Hiroshi Kubo Kazunori Urushibara

### Abstract

Solidification by cement is very effective in treatment of mud (bottom sediment). The solidification methods are classified into three kinds according to the total treating system. The comparative strengths produced by fourteen solidifiers were examined. (1) The solidifiers were composed of CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>, etc. and classified according to six groups. (2) Solidifiers containing large amounts (11-13%) of SO<sub>3</sub> solidified the mud to the highest strengths. However, portland cement and like solidifiers were in the low-strength range. (3) By X-ray diffraction and scanning electron microscope, it was shown that the formation of ettringite contributed greatly to increase in solidified strength.

### 概 要

ヘドロ(底質)を処分する際、固化処理は極めて有効な処理法の一つである。その処理システムには、ヘドロを①原位置において固化する原位置固化、②浚渫して処分地に投入後に固化する処分地固化、③浚渫して輸送途中に固化する輸送固化がある。そして、①および②では泥上作業車型処理機、処理船など、③ではクラムセル、ミキサーなどの処理機械が用いられる。つぎに、固化剤の比較試験(セメント系固化剤14種類、ヘドロ4種類)を行なって、有益な知見を得た。(1) 固化剤はCaO 47~65%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 4~10%、SO<sub>3</sub> 2~19%などを含み、化学組成によってI~VIのグループに分けられる。(2) ヘドロ固化試験の結果、SO<sub>3</sub>を多量(11~13%)含むVグループ固化剤が最大の強度を発現し、普通ポルトランドセメントと類似のIグループ固化剤の強度は小さかった。(3) X線回折および走査型電子顕微鏡による検討の結果、高い強度を示す固化ヘドロ中には、針状のエトリンジャイトが多量生成して間隙を充てん・架橋し、強度増大に大きく寄与していた。

### 1. まえがき

全国各地の河川・湖沼・港湾などには産業廃水あるいは生活廃水で汚染されたヘドロ(底質)が多量堆積しており、水域環境浄化のために除去対象となっているヘドロ量は河川・湖沼で6,700万 m<sup>3</sup>、港湾で1,900万 m<sup>3</sup>、港湾以外の海域で4億5,000万 m<sup>3</sup>といわれる。現在、これらヘドロの処理工事が進められている。

ところで、ヘドロは浚渫して所定の場所に処分、あるいは浚渫しないで原位置で処分されており、その際にヘドロは高含水比、超軟弱であるため、一般に土木的方法(圧密脱水を主体としたもの)と化学的方法(固化処理)に

よって処理が行なわれる。このうち、筆者らは特に化学的方法すなわち固化処理に関して、従来、多数の現場試験、調査・研究を実施した。そして固化処理はヘドロを短時間で所要強度まで改良する場合、また有害物質の溶出を防止する場合に優れた処理法であり、一方ヘドロの性状(含水比、有機物量など)によっては多量の固化剤を必要とし不経済となることを報告している<sup>1)</sup>。本報では、まずヘドロの固化処理工法について整理し、つぎに各種固化剤の比較試験を行ない有益な知見を得たので、以下に述べる。

### 2. ヘドロ固化処理工法の概要

## 2.1. ヘドロ処理トータルシステムにおける固化処理の適用の種類

ヘドロは浚渫して所定場所に処分される場合と、浚渫しないで原位置で処分される場合があり、いずれの場合にもヘドロは高含水比・超軟弱であるため、土木の処理あるいは化学的処理などを必要とする。ところで、ヘドロの処分が完了するまでの工程をトータルシステムというならば、トータルシステムの中で化学的固化処理を用いる場合、そのトータルシステムは化学的固化処理の適用方法によって三つに分けられる。すなわち、図-1に示すように、固化処理が適用されるトータルシステムは、①原位置固化(浚渫しないで原位置で固化)、②処分地固化(浚渫して埋立地などの処分地に投入したのち固化)、③輸送固化(浚渫して処分地に輸送するまでの間に固化)に分類される。

これらのシステムの中でいずれのシステムを採用するか、すなわちヘドロ処理のトータルシステムの中で固化処理をどのように適用するかは、図-1のフローに示すように、ヘドロ処分地までの距離およびその容量・ヘドロ受入れ条件、ヘドロの堆積地条件などによって決定される。

## 2.2. 固化処理の適用と主要機械

固化処理の適用と主要機械について、前述したトータルシステムにおける固化処理の適用の種類別に整理したものを表-1に示す<sup>2)</sup>。

原位置固化はヘドロを原位置で封じ込める場合、封じ込めて陸地化し強化地盤とする場合、固化状態で掘削し処分地へダンプ運搬する場合などに適用される。また、処分地固化は主としてポンプ浚渫されたヘドロについて

処分地で強化地盤を造成する場合などに適用される。これらシステムにおける固化処理の範囲は表層のみの場合と全層の場合とがある。表層固化は表層の1~2mを固化するもので、土木の処理との併用が多く、その際、土木の処理機械のトラフィカビリティ確保、土砂まき出し時のヘドロの陥没・側方流動防止などのために行なわれる。一方、全層固化はヘドロ層全体を固化するもので、早急に強化地盤を造成する場合、土木の処理を併用できない場合、有害ヘドロを処理する場合などに適用される。また、これらのシステムで用いられる処理機械として、地耐力が比較的認められる ( $q_c \approx 0.5 \sim 1.5 \text{ kg/cm}^2$ ) ヘドロでは泥上作業車型処理機、流動状態で地耐力がほとんどないヘドロでは処理船などがある。

つぎに、輸送固化はヘドロを未硬化状態で処分地に送り、裏込め利用または強化地盤を造成する場合、固化状態で処分地へダンプ運搬する場合などに適用される。処理機械としては、クラムセル、ミキサーなどが用いられる。

なお、輸送固化の一例として、当社では、昭和54年2月~5月に田子の浦港の有機ヘドロの処理を行なった。その概要は以下のとおりである。Grab船で浚渫されバージ船(500 $\text{m}^3$  積み)で運搬されてきたヘドロを岸壁において2台のクラムセルで固化処理を行なった(セメント系固化剤12%添加)。そして、固化ヘドロはバージ船内で1日養生し、揚陸してさらに1日養生後、ダンプで約5km離れた富士川河川敷まで運搬し、埋立処分された。なお、処理ヘドロ量は約12万 $\text{m}^3$ (約1,400 $\text{m}^3$ /日)で、当社は固化処理・揚陸を担当した。

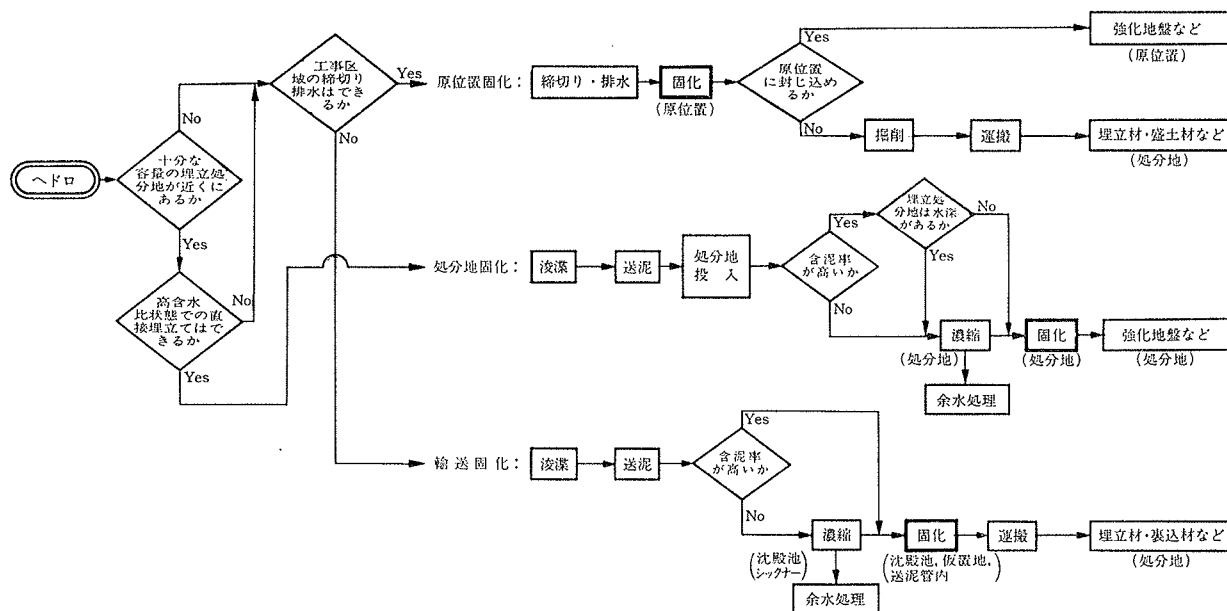
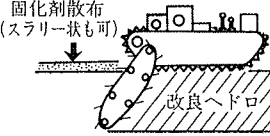
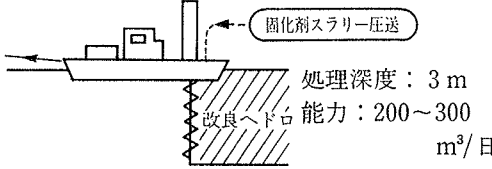
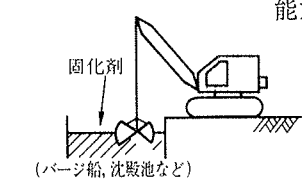
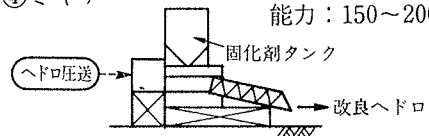


図-1 ヘドロ処理トータルシステムにおける化学的固化処理の適用

システム	適用	主な処理機械	備考
原位置固化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原位置に封じ込める</li> <li>・原位置を陸地化し強化地盤を造成する</li> <li>・固化状態で掘削し処分地へダンプ運搬する</li> <li>・有害物質の溶出を防止する</li> </ul>	①泥上作業車型処理機 接地圧：0.08kg/cm <sup>2</sup> 処理深度：1.5m 能力：400～500m <sup>3</sup> /日 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・工事区域の締切り・排水を行なうのが望ましい</li> </ul>
処分地固化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・主としてポンプ浚渫したヘドロについて処分地で強化地盤を造成する</li> <li>・有害物質の溶出を防止する</li> </ul>	②処理船(例, MUD-FIX 処理船) 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・処分地でヘドロが十分に沈降濃縮したのち固化処理することが経済的である</li> </ul>
輸送固化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・未硬化状態で処分地に投入し裏込め利用または強化地盤を造成する</li> <li>・固化状態で処分地へダンプ運搬する</li> <li>・有害物質の溶出を防止する</li> </ul>	③クラムセル 能力：300～500m <sup>3</sup> /日 (2m <sup>3</sup> バケツ)  ④ミキサー 能力：150～200m <sup>3</sup> /日 	<ul style="list-style-type: none"> <li>・浚渫はできるだけ高含泥率で行なうことが望ましい</li> <li>・混合状態を管理しやすい</li> </ul>

表一 へドロ処理における固化処理の適用と主要機械

### 3. 各種固化剤の比較

#### 3.1. はじめに

前章で述べたように、へドロの固化処理においては諸条件に適合するトータルシステムを選定し、最適の処理機械を用いることが重要である。さらに、もう一つ重要なこととして、固化剤が挙げられる。

へドロ固化剤には、セメント系と石灰系があるが、それら固化剤の効果は対象へドロの物理的・化学的性質の影響を大きく受ける。このため、へドロの性状によっては従来の一般的なセメントや石灰では対処困難な場合があり、セメントあるいは石灰に種々の助剤を配合したものも用いられている。しかし、各種固化剤の効果に関する統一的把握はほとんどなされていないため、固化剤の選定に際してはそのつど比較試験を行なわざるを得ない。

そこで、本章では、固化剤選定の際の基本的指針を得るために、へドロ固化処理で広く用いられているセメント系固化剤のうち14種類の固化剤について比較試験を行なった。結果の一部を以下に述べる。

#### 3.2. 供試へドロ(土)と試験方法

表一に示すように、田子の浦港へドロ(パルプ工場廃水などに起因する有機物を非常に多量含む、以下田子

の浦という)、勝島へドロ(生活廃水などで汚染された港湾の有機へドロ、以下勝島という)、霞ヶ浦へドロ(有機物が比較的少ない湖沼のへドロ、以下霞ヶ浦という)、大手町粘土(ビル建設工事の基礎掘削残土、以下大手町という)の4種類のへドロおよび土を供試した。

これらの土を沈定含水比(固化分濃度として5%で水に懸濁・静置沈降させ、ほとんど平衡に達したのちの沈定状態の含水比)に調製したものに、スラリー状(W/C=0.8)にした固化剤を添加混合し、φ3cm×h7cmのモールドに入れ、20℃で所定期間密閉養生したのち、一軸圧縮強度を測定した。その際、固化剤として、代表的な14種類のセメント系固化剤を供試し、添加量は田子の浦へドロに対して15%、他のへドロ(土)に対して10%とした。

	粘土 (%)	シルト (%)	砂 (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	Gs	Ig-loss (%)	沈定含水比 (%)
田子の浦へドロ	77	12	11	268	54	214	2.34	43	510
勝島へドロ	36	51	13	120	43	77	2.45	23	230
霞ヶ浦へドロ	38	47	50	113	35	78	2.52	11	250
大手町粘土	50	49	1	114	52	62	2.61	6	250

表二 供試土の性状

つぎに、一部の固化試料について、粉末法によるX線回折、またCRU法で試料調製したのち走査型電子顕微鏡観察を行なった。

3.3. 結果と考察

3.3.1. 固化剤の化学組成 固化剤の硬化はその化学組成、粒度(比表面積)、結晶度などによって異なる。ここでは、それらのうち特に影響が大きいと考えられる化学組成の差異について検討した。

各種固化剤の化学組成を図-2に示す。Aは普通ポルトランドセメントであり、B~Nはヘドロ固化用として用いられるものである。固化剤はいずれもセメントをベースとしたもので、CaO, SiO<sub>2</sub>を主体とし、その他にAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, SO<sub>3</sub>などの成分を含む。しかし、図示するように、各成分の含有量にはばらつきがあり、CaO 47~65%, SiO<sub>2</sub> 16~29%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 4~10%, SO<sub>3</sub> 2~19%の範囲である。そして、SO<sub>3</sub>含有量に特徴的なことが認められ、B~NはAよりも多量のSO<sub>3</sub>を含有しており、ヘドロ固化剤としての効果を高めるために、セメントにSO<sub>3</sub>成分がさらに添加されていることが判明する。なお、これらのSO<sub>3</sub>成分は半水石膏(CaSO<sub>4</sub>·0.5H<sub>2</sub>O)または2水石膏(CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O)の形で添加されている。

そこで、CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> および SO<sub>3</sub> の各含有量によって固化剤を分類した結果、図-2に示すように、I~VIのグループに分けられた。

I: 普通ポルトランドセメントに類似の化学組成を有する。

II: CaO が非常に少なく, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub> が非常に多い

III: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が多く, SO<sub>3</sub> がやや多い

IV: CaO が少なく, SO<sub>3</sub> が多い

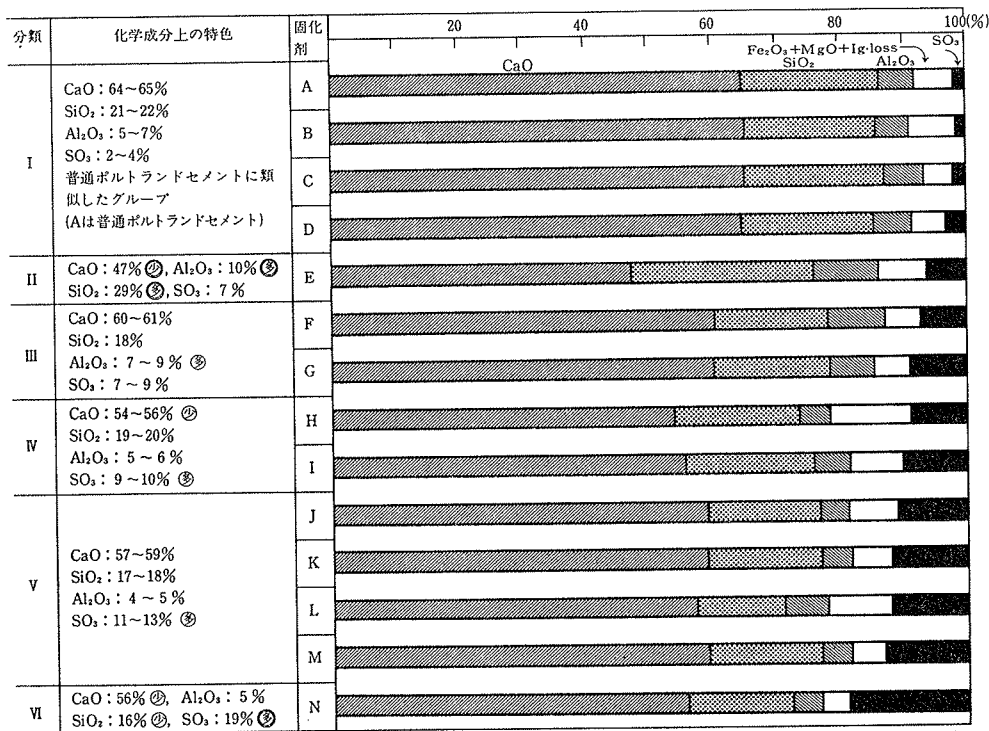
V: SO<sub>3</sub> がかなり多い

VI: CaO·SiO<sub>2</sub> が少なく, SO<sub>3</sub> が非常に多い

3.3.2. 固化剤の種類と強度の関係 各種固化剤による4種類のヘドロ(土)の固化強度(一軸圧縮強度・28日)を図-3に示す。強度は固化剤の種類によって異なり、大手町では4.9~10.5 kg/cm<sup>2</sup>、霞ヶ浦では1.7~7.8 kg/cm<sup>2</sup>、勝島(以上、固化剤10%添加)では0.1~1.9 kg/cm<sup>2</sup>、田子の浦(固化剤15%添加)では0.2~1.2 kg/cm<sup>2</sup>であった。なお、勝島・田子の浦が大手町・霞ヶ浦に比べて低強度であるのは、ヘドロ(土)の有機物含有量の差異などによると考えられる。

そこで、これら固化試験の結果を強度比で表示したものを図-4に示す。同図では、固化特性に優れているKの強度を基準(100)とし、また有機物の少ない大手町と霞ヶ浦、有機物の多い勝島と田子の浦のそれぞれ平均強度で表示した。図示するように、いずれのヘドロ(土)に対しても高い強度を示すのはKであった。そして、強度は3.3.1.で述べた固化剤分類と対応することが認められる。

固化剤分類に従って固化強度を整理すると、以下のようになる。Iグループでは、Dが有機物の少ない土に対してのみ中くらいの強度を示すが、全体としていずれのヘドロ(土)に対しても強度が低い。IIグループはいずれ



注) ㊟は顕著なことを示す。

図-2 各種固化剤の化学成分

のヘドロ(土)でも最低の強度を示す。IIIグループはいずれのヘドロ(土)でも、Fが中くらいの強度、Gが高い強度を示す。IVグループでは、Hが有機物の少ないヘドロ(土)に対してのみ高強度を示すが、全体として中位の強度である。Vグループはいずれのヘドロ(土)に対しても高い強度を示す。最後に、VIグループはいずれのヘドロ(土)でも中くらいの強度である。

上述のように、強

度は固化剤分類結果と対応することが判明したので、固化剤の化学組成と強度の関係を検討した。その結果、図-5に示すように、化学組成としてCaOとSO<sub>3</sub>の影響が特に明瞭であった。図において、最高の強度を示すKを中心にして、高い強度のVグループが分布し、そのすぐ隣りに同じく高い強度を示すIIIグループのGが存在している。そして、Vグループをとり囲むように、中くらいの強度のIII、IV、VIの各グループが分布している。さらに、これからかなり離れた場所に低い強度のIおよびIIのグループが分布している。

以上、CaO、SO<sub>3</sub>以外の化学組成が供試の各種固化剤と類似しているならば、固化強度はCaOおよびSO<sub>3</sub>の含有量によって大きく影響される。そして、それらの含有量には最適値が存在し、供試した4種の土では、CaO 58~60%、SO<sub>3</sub> 9~13%の場合に高い強度を発現した。

3.3.3. X線回折法による強度の検討

固化剤の種類による強度の差異の原因を、さらに検討するため、X線回折法による鉱物学的検討を行なった。図-6にX線回折図の例として、田子の浦および霞ヶ浦のそれぞれ生土(未処理試料)、固化剤AおよびKによる固化試料のX線回折図を示す。

いずれのヘドロも生土では、一次鉱物の石英・長石および粘土鉱物を含んでいる。そして、両ヘドロともに固化剤Kによる固化試料(養生約30日)では、9.1° (9.73 Å), 15.8° (5.61 Å), 22.9° (3.88 Å) に明瞭なエトリンジャイト (Ettringite, 以下 Et と略す) の回

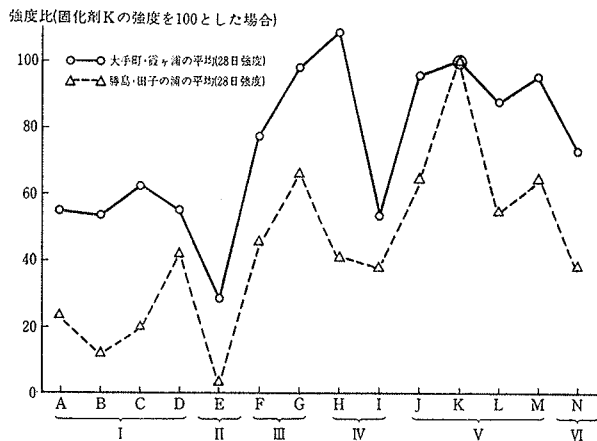


図-4 各種固化剤による強度比

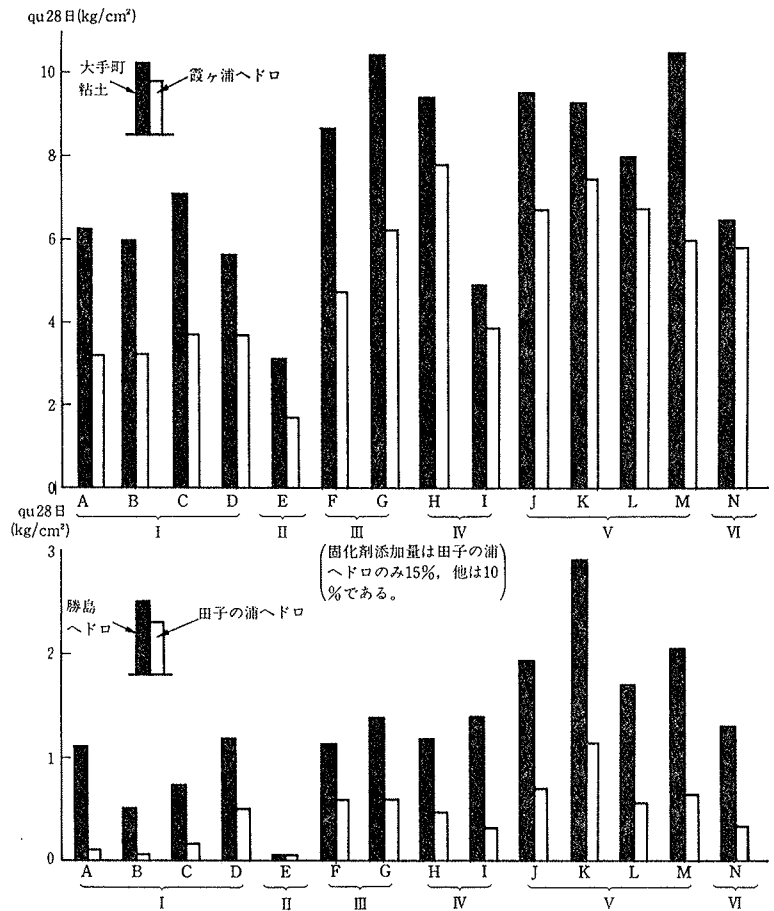


図-3 固化剤の種類と強度の関係

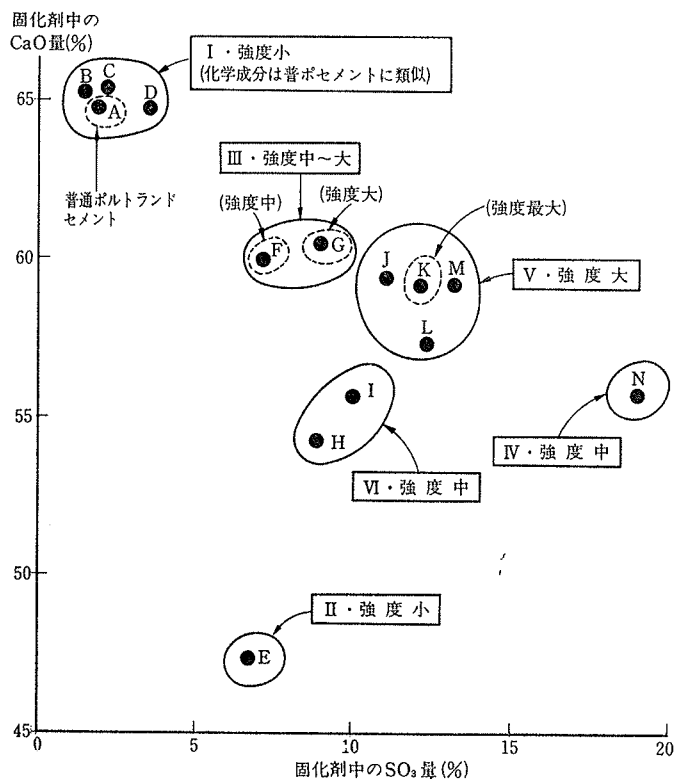
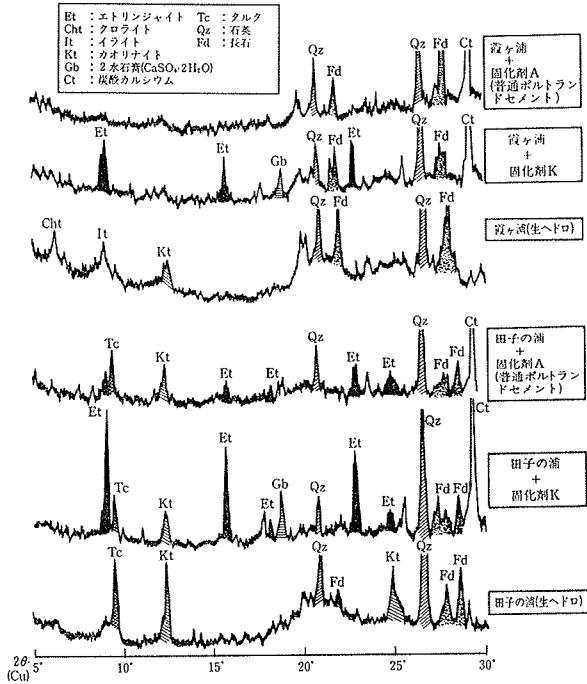


図-5 固化強度に及ぼす固化剤の化学組成の影響



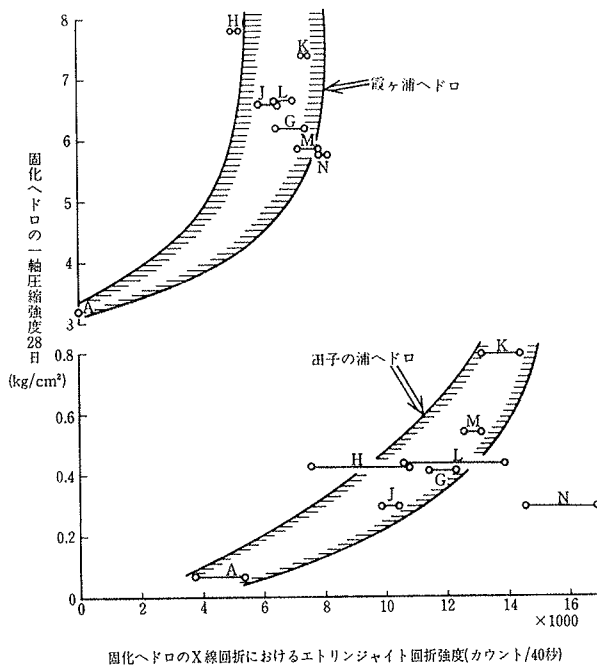
図—6 固化ヘドロのX線回折図の例

折ピークが現われる。一方、A(普通セメント)による固化試料については、このEtのピークは田子の浦ではわずかに認められ、霞ヶ浦では認められない。なお、いずれの固化ヘドロでも、Et以外のセメント水和鉱物のピークが認められないのは、測定条件などの影響によると考えられる。

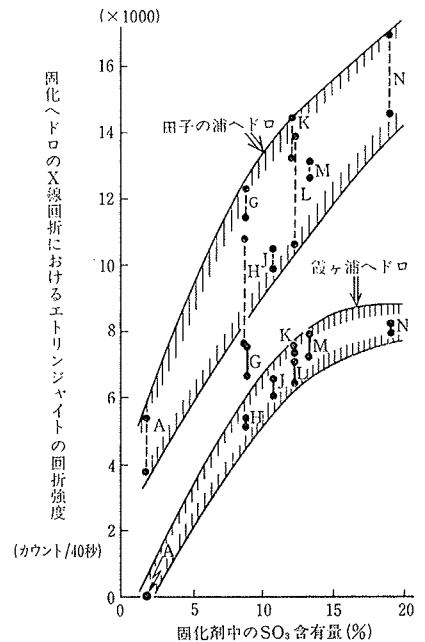
ところで、Etとは $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ の示

性式で表わされる針状鉱物であり、筆者らはヘドロなどのセメント固化処理において、セメント水和鉱物に加えてこの鉱物の生成が強度増大に大いに寄与することを見出している<sup>3)</sup>。そこで、固化ヘドロ中のEt生成量と強度の関係、固化剤の化学組成とEt生成量の関係を以下に検討した。

Et生成量は、ここでは $9.1^\circ$ のEt



図—7 固化ヘドロのエトリンジャイト生成量と強度の関係



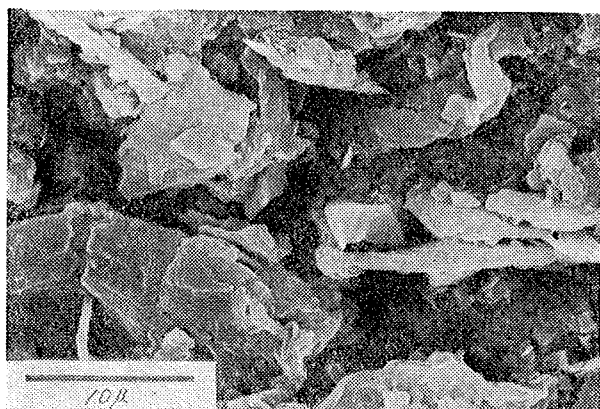
図—8 固化剤中のSO<sub>3</sub>含有量と固化ヘドロ中のエトリンジャイト生成量の関係

回折線における回折X線強度を40秒間カウントする方法で測定した(3回くり返し)。図—7に固化ヘドロ中のEt生成量と強度の関係を示す。図示するように、田子の浦では、Nを除き、強度はEt生成量とともに増大している。一方、霞ヶ浦では、強度はEt生成量のある一定値まではそれとともに増大し、Et生成量がある一定値以上になるとそれと無関係に増大している。

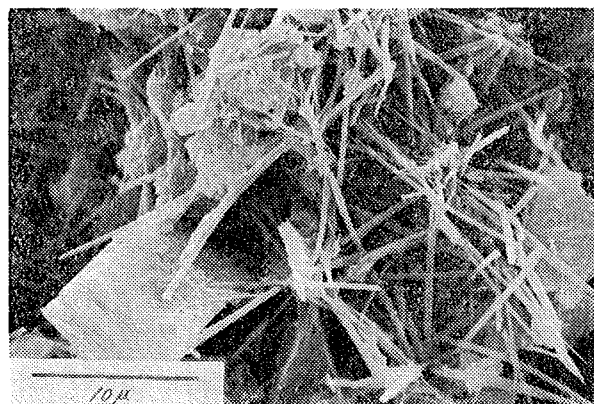
また、図—8に固化剤中のSO<sub>3</sub>含有量と固化ヘドロ中Et生成量の関係を示すように、いずれの固化ヘドロにおいても、Etは固化剤中のSO<sub>3</sub>含有量が多いほど、多量生成している。

以上、高い強度を発現する固化ヘドロはEtを多量生成しており、そのEt生成量は固化剤中のSO<sub>3</sub>含有量が多い(最大19%)ほど増大している。これらのことから、前項で述べたように、Vグループの固化剤(J, K, L, M)が相対的に高い強度を発現したのは、I~IVグループ固化剤に比べてSO<sub>3</sub>を多量含んでおり、セメント水和鉱物に加えて、Etを多量生成したことによることが判明した。

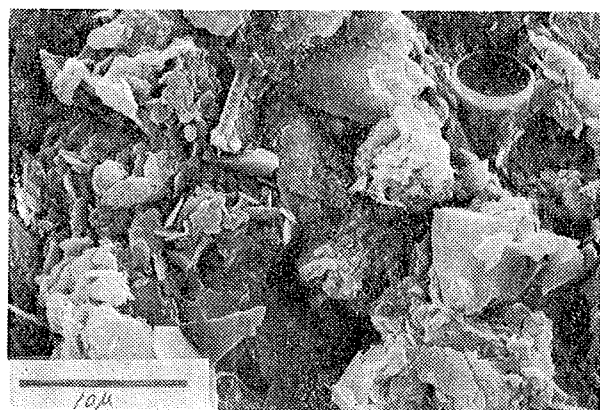
なお、固化剤Nが多量のSO<sub>3</sub>を含み、Etを最も多量生成したにもかかわらず、固化強度が中程度に落ち着いたのは、固化強度においてEtと同様に重要である他のセメント水和鉱物の生成状態が不良であったことによると考えられる。また、霞ヶ浦において、Et生成量がある一定値以上になると、強度がEt生成量に無関係に増大したことも、他のセメント水和鉱物の生成状態の影響などによると推察される。



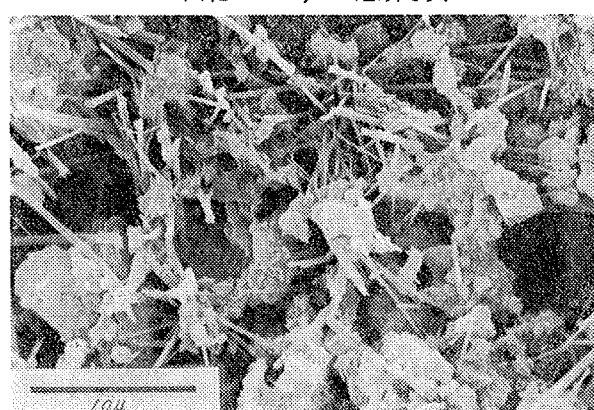
写真一 田子の浦ヘドロ (生ヘドロ) の電顕写真



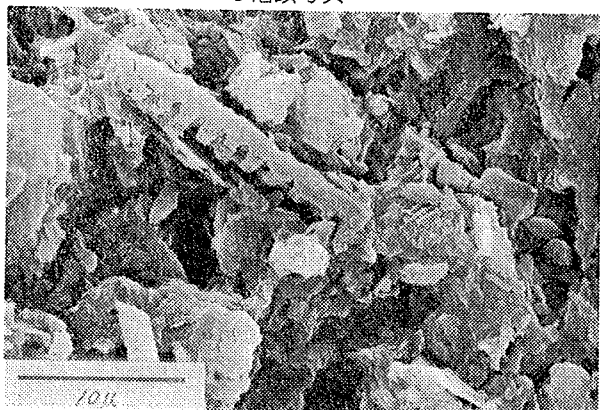
写真二 田子の浦ヘドロ (K固化剤による固化ヘドロ) の電顕写真



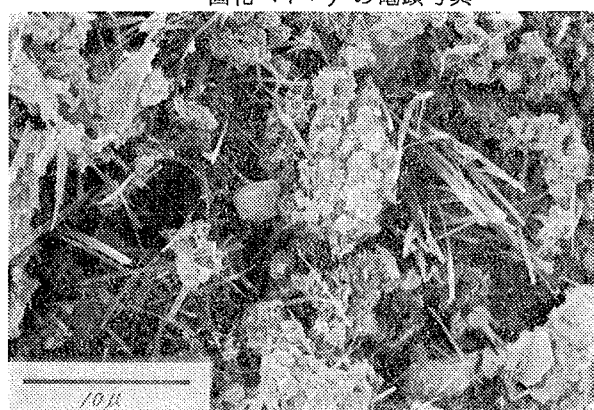
写真三 勝島ヘドロ (生ヘドロ) の電顕写真



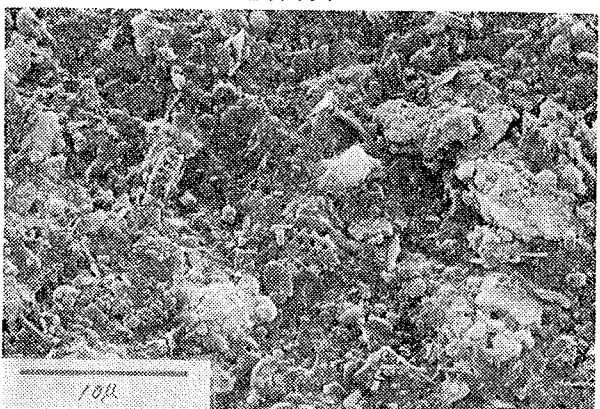
写真四 勝島ヘドロ (K固化剤による固化ヘドロ) の電顕写真



写真五 霞ヶ浦ヘドロ (生ヘドロ) の電顕写真



写真六 霞ヶ浦ヘドロ (H固化剤による固化ヘドロ) の電顕写真



写真七 大手町粘土 (生土) の電顕写真



写真八 大手町粘土 (M固化剤による固化土) の電顕写真

3.3.4. 走査型電子顕微鏡による強度の検討 固化剤による強度差異の原因について、走査型電子顕微鏡（走査電顕）によって検討した。写真—1～8に、田子の浦、勝島、霞ヶ浦、大手町のそれぞれ生ヘドロ(土)および固化ヘドロ(土)の走査電顕写真を示す。なお、各固化ヘドロ(土)の写真はそれぞれのヘドロ(土)で最大の強度を発現したものを例示した。

写真に示すように、固化ヘドロ中には、Et 以外のセメント水和鉱物の粒塊が形成され、それらの間隙を針状結晶の Et が充てんし、さらに粒塊を架橋している。このことから、Et の生成が Et 以外のセメント水和鉱物の生成と同様に、固化ヘドロの強度増大に大いに寄与していることが容易に類推され、前項のX線回折の結果とも一致する。

なお、固化剤の種類による Et 結晶の量、結晶度などについては、Et 生成がほとんどないIグループ固化剤（普通ポルトランドセメント類似）を除き、明瞭な差は認められなかった。

#### 3.4. まとめ

14種類のセメント系固化剤について比較検討を行なった結果、有益な知見が得られた。

(1) 固化剤の主成分は CaO(47～65%)、SiO<sub>2</sub>(16～29%)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(4～10%)、SO<sub>3</sub>(2～19%) などであり、これら成分の含有量によって固化剤は I～VIのグループに分類される。

(2) 有機物量などの異なる4種類のヘドロおよび粘土を用いて、固化試験を行なった結果、SO<sub>3</sub>を多量(11～13%)含むVグループの固化剤が最大の強度を発現し、普通ポルトランドセメントと類似の化学組成を有するIグループ固化剤の強度は小さかった。なお、SO<sub>3</sub>を非常に多量(19%)含むVIグループ固化剤は中位の強度であった。

(3) X線回折および走査型電子顕微鏡によって検討し

た結果、高い強度の固化ヘドロ(土)中には、針状のエトリンジャイトが多量生成していた。このエトリンジャイトは、エトリンジャイト以外のセメント水和鉱物と土粒子の粒塊間を充てんし、架橋して、強度増大に重要な効果を及ぼしていた。そして、エトリンジャイト生成量は固化剤中の SO<sub>3</sub> 含有量とともに増大することから、SO<sub>3</sub> を多量含むVグループ固化剤が高い強度を発現するのは、エトリンジャイトの生成が大いに寄与しているためである。なお、SO<sub>3</sub> を多量含むVIグループ固化剤がエトリンジャイトを多く生成したにもかかわらず、中位の強度を呈したのは、エトリンジャイト以外のセメント水和鉱物の生成が不良であったことによると考えられる。

#### 4. あとがき

当社では、MUD-FIX 工法と称するヘドロ固化処理工法によって、各種のヘドロ処理工事に対応する体制を確立している。本稿で述べたように、MUD-FIX 工法では、種々の条件に適合した処理システムを検討し、最適の処理機械を使用して、また固化剤に関してヘドロの量・性状、処理処分条件に適合した経済的なものを使用することを基本としている。さらに優れたヘドロ処理工法を開発するため、調査・研究を継続している。

#### 参考文献

- 1) 喜田、久保、辻、炭田：汚泥の処理処分に関する研究（第1報～第9報）、大林組技術研究所報、(1974～1979)
- 2) 喜田：汚泥（へどろ）の法状と処理処分について、土質工学会中部支部、汚泥の処理処分に関する研究会テキスト、(1979)
- 3) 喜田、久保、辻、炭田：汚泥の処理処分に関する研究（第7報）、大林組技術研究所報、No. 18、(1979)、pp. 90～94