

## 土工事における濁水処理に関する研究 (第2報)

—土の酸化・還元が凝集剤による沈殿スラッジの脱水性に及ぼす影響 (その1) —

喜 田 大 三  
辻 博 和

### Studies of Muddy Water Treatment in Earthwork (Part 2) —Influences of Oxidation or Reduction of Soil on Dehydration Performance of Sludge Containing Flocculant (I)—

Daizo Kita  
Hirokazu Tsuji

#### Abstract

Various kinds of muddy water are produced by dredging work on "Hedoro." These muddy waters are required to be separated into sludges and liquids from the standpoint of preventing pollution. Furthermore, these sludges must be dehydrated. The studies herein were thus conducted to investigate the influences of oxidation or reduction of soil on dehydration performances of sludges containing organic flocculants (e.g., polyacrylamide). The following results were obtained: (1) oxidation or reduction of soil has no influence on the type of flocculant suitable for accelerating permeation and dehydration, (2) reduced soil has lower coefficient of permeability and dehydration rate than oxidized soil at equal flocculant density, (3) permeability and dehydration rate are established by the settling rate of flocs, (4) compressibility of sludge is influenced by oxidation or reduction of soil, and by the type of flocculant.

#### 概 要

港湾・海域等に堆積しているヘドロの掘削・浚渫工事で発生する濁水は、公害防止の立場から、凝集剤を添加して濁水中のSS成分を沈殿除去しなければならない。そしてその沈殿スラッジはその後の使用目的にかかわらず脱水する必要がある。そこで、一種類の代表的粘性土を供試し、ヘドロと同様の還元状態のもの(還元土)および酸化状態のもの(酸化土)について、表題の内容に関して検討し、以下のことが判明した。(1)凝集剤の添加濃度の増加とともに、沈殿スラッジの透水係数ならびに上水消失後の脱水速度は増大する。その際、土の酸化・還元に関係なく、アニオン系凝集剤がノニオン系より優れている。(2)酸化土に比べて還元土では、透水係数ならびに脱水速度が非常に低い。(3)透水係数ならびに脱水速度は、土質の状態、凝集剤の種類等が同じの場合、フロックの沈降速度のみによって表現できる。(4)沈殿スラッジの圧縮性は、酸化土と還元土とで顕著な差が認められない。しかし、凝集剤の種類および添加濃度によって大きく異なる。

#### 1. はじめに

産業廃水中の水銀等の有害物質によって汚染されたヘドロ(有害ヘドロ)あるいは産業廃水・生活雑廃水等によって汚染された有機物含有量の高いヘドロ(有機ヘドロ)が日本全国の各地の港湾・海域等に多量に堆積している。これらヘドロによって水質汚濁等の2次汚染が引き起こされ、人間の生活環境を悪化させることが懸念されている。そこで、環境の浄化をはかるために、有害ヘドロあるいは有機ヘドロを掘削除去し

所定の場所に封じ込める工事がいそがれている<sup>1)</sup>。

ヘドロの除去工事にあたり、ヘドロは、含水比をあげないで浚渫する工法も検討されているけれども、多くの場合、濁水として処分地にパイプ輸送される。その処分地ではいわゆる浚渫濁水が発生する。また、処分地内での土工事に際しても濁水が発生する。

これら濁水中のSS(懸濁物質)濃度は、排水基準値(たとえば総理府令の200ppm)以上の場合が多く、濁水を凝集沈殿処理してSS成分を除去しなければならない。さらに、有害ヘドロから発生する濁水のSS

濃度がたとえ 200ppm 以下でも、排水基準値以上の有害物質を含む際には、SS 濃度を一層さげなければならない。筆者らの研究<sup>2)</sup>によれば、濁水中の有害物質濃度は SS 濃度と正相関にあることが認められるので、濁水中の有害物質を除くためにも、基本的には濁水中の SS 成分を除去すればよい。

さて、一般にヘドロは微細なコロイド状物質を多く含むので、ヘドロ浚渫工事で発生する濁水中の SS 成分は、凝集剤無添加で除去しにくく、凝集剤を添加して沈殿除去するのが普通である。この沈殿除去された凝集剤を含むスラッジは、その後の使用目的にかかわらず、脱水せざるを得ない。この沈殿スラッジの脱水性すなわち脱水時の諸性状（透水係数・脱水速度・間隙比そして圧縮性など）に関する研究は少なく、その挙動を明確にする必要がある。ところで、上述のヘドロはすべて還元状態の土（還元土）であるが、その挙動をより一層明確にするために、還元土とは土粒子界面の性状をまったく異にする酸化状態の土（酸化土）も供試し、主として使用されている有機系高分子凝集剤を添加した際のスラッジについて、海水条件下の脱水時の諸性状を比較検討した。

なお、土の酸化・還元が各種有機系高分子凝集剤の沈降性能に及ぼす影響については、すでに、所報 No. 10 に発表している<sup>3)</sup>。

## 2. 実験概要

### 2.1. 供試土と有機系高分子凝集剤

供試土として、表一に示すような物理的性質をもつ粘土質シルトの酸化土と還元土とを使用した。これらの試料を人工海水（NaCl 濃度 2.72%）に懸濁せしめ、10%濃度（乾土内割%）の濁水を作成し、実験に供試した。

有機系高分子凝集剤としては、アニオン系（凝集剤 A）・ノニオン系（凝集剤 C）の 2 種類のポリアクリルアミド系の凝集剤を用い、いずれも凝集剤濃度 0.01% の水溶液にして使用した。

試料	湿润土土色*	粒 径 分 布			コンシステンシー			真比重
		砂分	シルト分	粘分	LL	PL	PI	
酸化土	オリーブ褐色 (2.5Y4/4)	13.0%	49.7%	37.3%	45.7%	21.8%	23.9	2.625
還元土	緑灰色 (7.5GY5/1)	12.5	52.8	34.7	37.8	16.4	21.4	2.621

\*農林省監修新版標準土色帳による

表一 供試土の物理的性質

### 2.2. 実験方法

所定濃度の凝集剤を添加した濁水を沈降管にとり、一定速度で一定回数回転倒したのち静置し、上水とフ

ロック層との界面の沈降して行く沈降速度( $V_{rcm/min}$ )を測定する。そして、再度沈降管を一回転倒したのち API 規格のろ過試験器に濁水を移し、一定時間放置後ろ過圧 0.7kg/cm<sup>2</sup>(約500mmHg)、使用ろ紙No. 2、有効ろ過面積 45.36cm<sup>2</sup>でろ過試験を行なう。

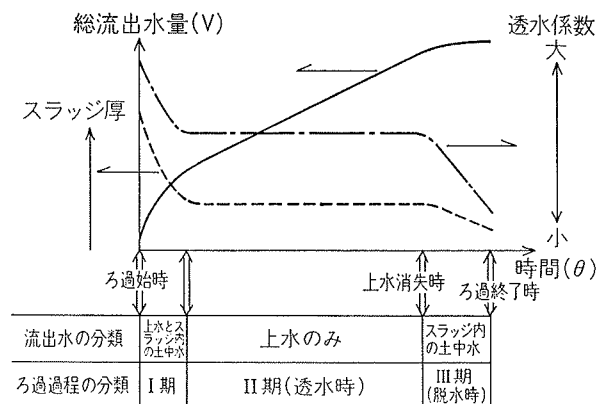
### 2.3. 実験項目

ろ過過程における総流出水量とスラッジ厚の経時的変化を模式的に示すと図一1のようになり、ろ過開始からろ過終了までの期間は大別すると以下のように 3 つの期間に分けられる。

- 第 I 期：ろ過開始とともにスラッジ厚が減少し、スラッジ厚が一定になるまでの期間。（第 II 期・第 III 期と比べて非常に短期間である）
- 第 II 期：スラッジ厚が一定で、上水のみが流出している期間。（透水時）
- 第 III 期：上水が消失後、スラッジ厚がふたたび減少しはじめ、ろ過試験終了まで、スラッジ内の土中水のみが流出している期間。（脱水時）

以上の 3 つの期間について、以下に示す項目について測定を行なう。

- (1) 沈殿スラッジの透水係数 ろ過試験第 II 期における全透水時間の透水量とスラッジ厚を測定し、透水係数  $k$  (cm/sec) を算出する。
- (2) 沈殿スラッジの脱水速度 ろ過試験第 III 期における全脱水時間と全脱水量を測定し、脱水速度  $V_d$  (cm<sup>3</sup>/min) を算出する。
- (3) 脱水前後における沈殿スラッジの性状 ろ過試験第 II 期とろ過試験終了後のスラッジの間隙比を測定する。
- (4) 沈殿スラッジの圧縮性 脱水前（透水時）と脱水後のスラッジの間隙比から、沈殿スラッジの圧縮率を算出する。



図一1 ろ過過程の総流出水量・スラッジ厚等の経時的変化 (模式図)

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1. 沈殿スラッジの透水係数および脱水速度

凝集脱水処理における凝集剤の処理効果を判定するには、従来からリーフ試験やプフナー・戸斗試験が行なわれている。これらの試験ではろ過の全過程における平均ろ過速度を測定している。しかし、図-1で説明したように、ろ過過程は大別すると3つの期間に分けられる。そこで筆者らは、脱水処理における凝集剤の処理効果を検討するために、ろ過過程の第II期における透水係数と、上水消失後すなわち第III期における脱水速度をそれぞれ測定した。

まず、酸化土あるいは還元土の濁水に対して、凝集剤AあるいはCの添加濃度を変化させたときの沈殿スラッジの透水係数の変化を図-2に、その脱水速度の変化を図-3に示す。

両図から明らかなように、酸化土・還元土ともに、凝集剤の添加濃度の増加に対応して、透水係数および脱水速度は大きくなる傾向にある。しかし、これらの性質は土質の状態別・凝集剤の種類別によって大きく異なっている。

そこでまず、凝集剤の種類の違いの影響を検討する。凝集剤添加による透水係数あるいは脱水速度増大の処理効果は、酸化土と還元土とは関係なく、凝集剤Aが凝集剤Cより顕著にすぐれている。このことは、先報<sup>3)</sup>の内容、すなわち凝集剤Aが酸化土・還元土両方について沈降促進に最適な凝集剤であるという事実と一致している。

つぎに、凝集剤の同一添加濃度における酸化土と還元土の違いの影響を検討する。図-2において、凝集

剤Aの場合、還元土の透水係数は酸化土のその1/4~1/5であり、凝集剤Cの場合、還元土の透水係数は酸化土のその1/3~1/4となっている。一方、図-3において、凝集剤Aの場合、還元土の脱水速度は酸化土の1/3~1/4であり、凝集剤Cの場合、還元土の脱水速度は酸化土の1/2~1/3となっている。すなわち、酸化土に比べて還元土では、凝集剤の種類に関係なく、透水係数および脱水速度が非常に低いことが判明した。このことは、先報<sup>3)</sup>の内容、すなわち所定の初期沈降速度を得るのに、還元土は酸化土に比較して非常に多量の凝集剤を必要とするという事実とやはり類似している。

以上のように、凝集剤添加による沈殿スラッジの透水係数ならびに脱水速度の増加傾向は凝集剤添加によるフロックの沈降促進効果の挙動と類似していた。そこで、これらの性質とフロックの沈降速度との関係について次節で検討する。

#### 3.2. フロックの沈降速度と沈殿スラッジの透水係数および脱水速度との関係

各濁水に対して所定濃度の凝集剤を添加した際に生成するフロックの沈降速度と沈殿スラッジの透水係数との関係を図-4に、さらにフロックの沈降速度と上水消失後の沈殿スラッジの脱水速度との関係を図-5に示す。両図から明らかなように、土質の酸化・還元状態そして凝集剤の種類に関係なく、フロックの沈降速度の増大とともに沈殿スラッジの透水係数ならびに脱水速度は増大している。そして、沈降速度(対数値)と透水係数(対数値)、さらには沈降速度(対数値)と脱水速度との間に直線関係が成立するという全く新しい知見を得ることができた。

透水係数  $k$  (cm/sec)

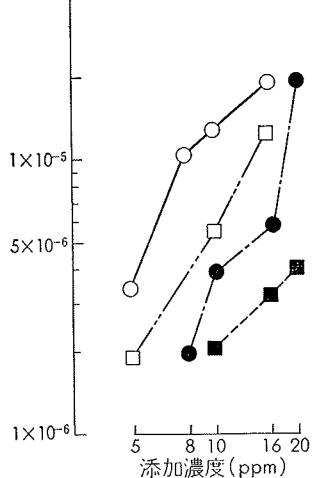


図-2 沈殿スラッジの透水係数

記号	土質	凝集剤
○	酸化土	A
●	還元土	A
□	酸化土	C
■	還元土	C

脱水速度 (cm<sup>3</sup>/min)

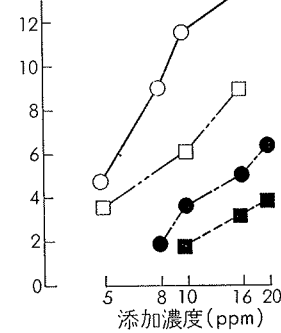


図-3 沈殿スラッジの脱水速度

透水係数  $k$  (cm/sec)

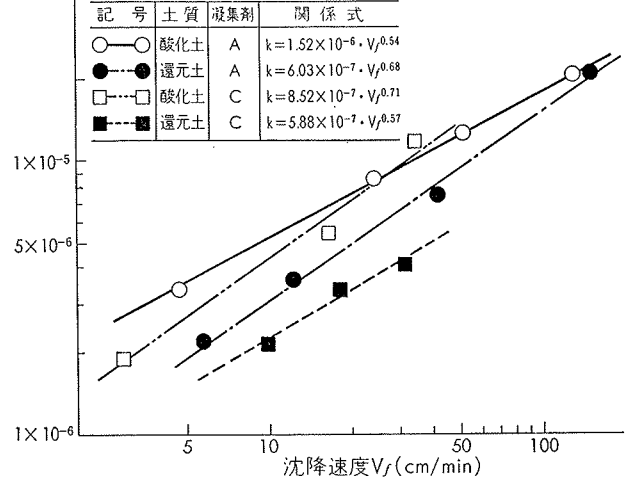


図-4 フロックの沈降速度と沈殿スラッジの透水係数との関係

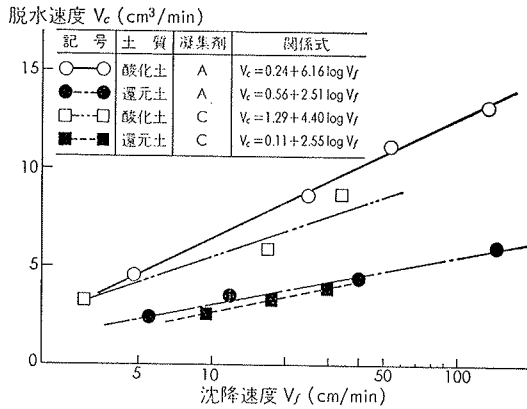


図-5 フロックの沈降速度とスラッジの脱水速度との関係

そこで、土質の状態別・凝集剤の種類別に、フロックの沈降速度  $V_f$  (cm/min) と沈殿スラッジの透水係数  $k$  (cm/sec) との関係式を図-4中に、フロックの沈降速度と沈殿スラッジの脱水速度  $V_c$  (cm³/min) との関係式を図-5中にそれぞれ示した。そしてこれらの関係式は下記の一般式で表わしうる。

$$\begin{cases} k = k_0 \cdot V_f^a \\ V_c = V_{c0} + b \cdot \log V_f \end{cases}$$

ただし、 $k_0$ ,  $a$ ,  $V_{c0}$  および  $b$  は土質の状態そして凝集剤の種類によって定まる定数。

上記の一般式は一種類の土について得られた結果であるけれども、他の種類の土についても同様の関係式が得られると予想され、今後検討する予定である。

### 3.3. 透水時および脱水時における沈殿スラッジの間隙比

沈殿スラッジの透水係数についてはすでに述べてきたけれども、ここではさらに、透水係数と関連する透水時(図-1のⅡ期)の間隙比をとりあげ検討する。

各濁水に対する凝集剤の種類および添加濃度と透水時における沈殿スラッジの間隙比との関係を図-6に示す。図示したように、酸化土・還元土ともに、凝集剤の添加濃度の増加に対応して、間隙比は大きくなる傾向にある。しかし、酸化土に比べて還元土では、凝集剤の種類に関係なく、間隙比が小さく、そして凝集剤Aに比べて凝集剤Cでは、土質の状態に関係なく、間隙比が小さい。このような凝集剤添加による沈殿スラッジの間隙比の増大傾向は、先の3.1.で検討した透水係数の挙動と類似している。そして、ここでは特に図には示さないが、透水時の間隙比とフロックの沈降速度(対数値)との間に直線関係が成立することも判明している。また一般に、土質が同じ場合、土の透水

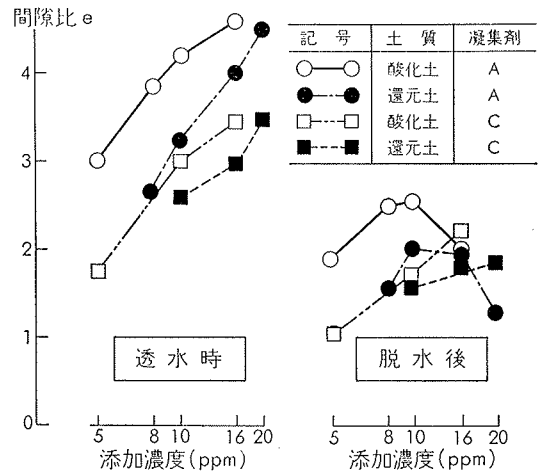


図-6 沈殿スラッジの間隙比

係数は土の間隙比によって決定されることが認められている<sup>4)</sup>。以上のことから、土質の種類、土質の状態そして凝集剤の種類が同じ場合には、フロックの沈降速度によってまず沈殿スラッジの間隙比が決定され、そしてその間隙比によって沈殿スラッジの透水係数が決定されるものと推定される。

つぎに、脱水前後における沈殿スラッジの間隙比の変化について説明する。さて、上記の透水時の間隙比は脱水時(図-1のⅢ期)のはじまりの間隙比でもある。そこで、脱水終了後の間隙比を測定し、図-6に併記した。当然のことながら、脱水によって間隙比は著しく減少している。ところで、脱水後の還元土の間隙比は、凝集剤の種類に関係なく、酸化土に比べて小さい。しかし、凝集剤の添加濃度にもなる間隙比の変化は凝集剤の種類によって大きく異なっている。すなわち、凝集剤Cの場合、酸化土・還元土ともに添加濃度の増加とともに間隙比は増大するが、凝集剤Aの場合には、間隙比を最大にする添加濃度が存在する。そして、その添加濃度は、酸化土で8~10ppm、還元土で10~16ppmである。以上のように、脱水前後における沈殿スラッジの間隙比の変化は、土質の状態・凝集剤の種類ならびに添加濃度によって大きく異なっていた。そこで、次節で脱水前後における沈殿スラッジの圧縮性について検討する。

### 3.4. 脱水時の沈殿スラッジの圧縮性

3.3.に前述したように、脱水前後(図-1のⅢ期)における開始時と終了時の沈殿スラッジの間隙比の変化は、土質の状態・凝集剤の種類ならびに添加濃度によって大きく異なっていた。そこで、脱水時における沈殿スラッジの圧縮率を算出し図-7に示す。

図から明らかかなように、凝集剤の添加濃度にもなる沈殿スラッジの圧縮率は酸化土と還元土とで顕著な

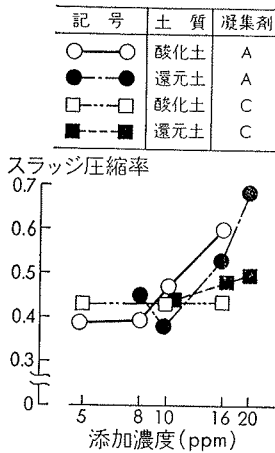


図-7 沈殿スラッジの圧縮率  
 については、沈殿スラッジの圧縮率が急激に変化する限界添加濃度が存在することが判明した。これに反し、凝集剤Cの場合、土質の酸化・還元状態に関係なく、添加濃度とともに、圧縮率は増加するけれども、その圧縮率は0.4~0.5の範囲で大きく変化しない。なお、凝集剤Cについては濁水処理の立場から、本実験以上の過剰添加濃度で実験を行なわなかったため、凝集剤Aについて認められたような限界添加濃度が存在するか否かについては不明である。

#### 4. まとめ

港湾・海域に堆積している有害ヘドロあるいは有機ヘドロの掘削・浚渫工事で発生する濁水は、公害防止の立場から、直接港湾等に排水できない。そこで、濁水中のSS成分は主に凝集剤を利用して沈殿除去している。その結果分離除去された沈殿スラッジは、その後の使用目的にかかわらず、脱水せざるを得ない。そのため、沈殿スラッジの脱水性に関する挙動を明確にする必要がある。

そこで、本報では、一種類の代表的粘性土を供試し、ヘドロと同様の還元状態のもの(還元土)および比較のため酸化状態のもの(酸化土)について、このような土の酸化・還元が有機系高分子凝集剤(ポリアクリルアミド系)による沈殿スラッジの脱水性に及ぼす影響について検討し、以下のことが判明した。なお、使用水は人工海水である。

(1) 沈殿スラッジのろ過脱水過程は3つの過程に大別することができる。その際、透水時(II期)の上水のろ過過程、および上水消失後の脱水時(III期)の土水中の脱水過程について、前者では透水係数を、後者では脱水速度を測定した。

(2) 沈殿スラッジの透水係数ならびに脱水速度は、凝集剤の添加濃度の増加とともに増大する。その際ア

ニオン系凝集剤がノニオン系凝集剤より優れている。そして、酸化土に比べて還元土では、沈殿スラッジの透水係数ならびに脱水速度が非常に低い。

ニオン系凝集剤がノニオン系凝集剤より優れている。そして、酸化土に比べて還元土では、沈殿スラッジの透水係数ならびに脱水速度が非常に低い。

(3) 沈殿スラッジの透水係数ならびに脱水速度は、土質の状態・凝集剤の種類が同じ場合、ブロックの沈降速度によって下記の一般式で表わしうる。

$$\begin{cases} k = k_0 \cdot V_f^a \\ V_c = V_{c0} + b \cdot \log V_f \end{cases}$$

ただし、 $j$  : 沈殿スラッジの透水係数 (cm/sec)

$V_c$  : 沈殿スラッジの脱水速度 (cm<sup>3</sup>/min)

$V_f$  : ブロックの沈降速度 (cm/min)

$k_0, a, V_{c0}$  および  $b$  : 土質の状態および凝集剤の種類によって定まる定数

(4) 透水時の沈殿スラッジの間隙比は、凝集剤の添加濃度とともに大きくなる。また、酸化土に比べて還元土において、そしてアニオン系凝集剤に比べてノニオン系凝集剤において、間隙比は小さい。

(5) 脱水時の沈殿スラッジの間隙比は、脱水とともに当然著しく減少する。そして、脱水後の還元土の間隙比は酸化土に比べて小さい。さらに、凝集剤の添加濃度とともに間隙比の変化は凝集剤の種類によって異なる、すなわち、ノニオン系では、添加濃度の増加とともに間隙比は大きくなるが、アニオン系では、過剰添加で逆に小さくなる。

(6) 脱水時の沈殿スラッジの圧縮率は、酸化土と還元土とで顕著な差が認められない。しかし、凝集剤の種類によって大きく異なる、すなわち、ノニオン系では添加濃度とともに余り変化しないが、アニオン系では過剰添加で著しく圧縮率が増大する。

さて、建設工事にともなって発生する濁水中の懸濁土粒子は酸化土か還元土かのいずれかに属するので、本報告で得られた以上の成果はこれら濁水処理において非常に有用である。著者らは、この成果をさらに一般化するため、淡水条件下も含めて各種の土について検討する予定である。

#### 参考文献

- 1) 環境庁水質保全局：底質の処理・処分等に関する暫定指針 (1974)
- 2) 喜田・辻・久保：大林組技研所内報 (1975)
- 3) 喜田・辻：大林組技研所報, No. 10, 121 (1975)
- 4) D. W. Taylor: Fundamentals of Soil Mechanics, 110~111