

# 浚渫ヘドロを用いた干潟造成を目的とした 高効率な浚渫底泥脱水技術の開発

## DEVELOPMENT OF A HIGH EFFICIENCY DEHYDRATION METHOD OF DREDGING SLUDGE FOR USE OF TIDAL FLAT CONSTRUCTION

片倉徳男<sup>1</sup>・上野成三<sup>1</sup>・小林峯男<sup>2</sup>・柴田隆宏<sup>3</sup>・今井大蔵<sup>4</sup>・村上和男<sup>5</sup>  
Norio KATAKURA, Seizou UENO, Mineo KOBAYASHI, Takahiro SHIBATA, Daizo IMAI  
and Kazuo MURAKAMI

<sup>1</sup>正会員 大成建設株式会社 技術センター(〒245-0051 東神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

<sup>2</sup>正会員 大成建設株式会社 土木本部(〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

<sup>3</sup>成和リニューアルワークス株式会社(〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

<sup>4</sup>財団法人三重県産業支援センター(〒517-0501 三重県志摩市阿児町鶴方3098-9)

<sup>5</sup>正会員 工博 武蔵工業大学教授工学部都市基盤工学科(〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

A new method for the dehydration of dredging sludge with high efficiency was developed. This new hydration method produces hydrated sludge with relatively high water content and low strength, which is enough for tidal flat construction, and achieve the increase of the efficiency of treatment and the reduction of the cost and the working space for the treatment. Using paper sludge as main content of flocculation material, a large scale of flock of dredging sludge can be produced. This results in the high efficiency of dehydration processes which consists of the first flocculation process in a tank and the second dehydration process by belt press. A small scale laboratory test and a large scale field test were carried out and verified the efficiency of this hydration method.

**Key Words :** *Dredging, Dehydrate, Tidal flats, Sediment quality purification,*

### 1. はじめに

水域環境において進行する水質汚濁を解消するために、水質、底質の改善が行われている。このうち、富栄養化物質が堆積した底質を改善する代表的な工法の一つとして浚渫工法がある。一般的な浚渫工法では、除去した含水比の高い底泥から様々な固液分離・脱水方式により水分を分離・脱水し、低含水比の脱水ケーキとして利用または処分されている。この固液部分離・脱水工程は、処分費用の低減や再利用時のハンドリングを容易にするために必要な工程である。そして、浚渫底泥の減容化が目的であるため、極力含水比を低減する方法が用いられている。従来の固液分離・脱水法は、泥水状の浚渫底泥に凝集材を添加して、泥水中に分散した土粒子を沈降可能な大きさまでフロック(凝集材により生成した土粒子の塊)として成長・沈降させる固液分離工程と、フロックと上澄水およびフロックの間隙水を分離する脱水工程にさらに分けられる。固液分離工程では、PAC(ポリ塩化

ルミニウム)に代表される凝集材が用いられ、さらに大型のフロックを形成させるために必要に応じて高分子凝集材などを添加する処理を行っている。脱水工程では、凝集・沈降したフロックから水分を分離・除去するために、圧力(0.5MPa以上)を加えて濾布で脱水するフィルタープレス処理や、ドラムプレス、スクリーンプレス等の脱水装置が使用されている。一方、排出される脱水ケーキは石灰・セメント系などの固化材を使用して強度を高め盛土などに利用されている他、処分場に廃棄されている。

しかし、浚渫事業は対象とする処理量が膨大であるとともに多岐にわたる処理システムにより処理コストが高く、さらに脱水ケーキの利用先や処分場の不足により処理が進んでいない。このような状況のなか、富栄養化した底質の脱水ケーキを沿岸域の人工干潟で再利用する資源循環型の干潟造成が行われている。著者らは、浚渫底泥と現地砂質土を混合した干潟土壌を利用した干潟再生実験を行い、干潟生物にとって最適な有機物含有量、シ



ルト・粘土含有量の範囲を明らかにし、浚渫底泥を用いた干潟再生工法を提案している<sup>1),2)</sup>。また、実規模スケールの人工干潟の造成工事において、脱水ケーキと砂質土を混合した干潟土壌の造成工法について、設計・施工方法を明らかにしている<sup>3)</sup>。浚渫底泥の利用先を人工干潟の土壌にした場合、「干潟造成地域までダンプ等で搬送可能」、「砂質土と混合が可能」、「干潟で分散・再溶出ししない」などの機能を満たせば、従来の脱水ケーキに比べ高い含水比の脱水ケーキが使用可能である。したがって、低い圧力による脱水処理や施設のコンパクト化を図った新たな処理方法の可能性がある。

本研究では資源循環型の人工干潟造成に浚渫底泥を利用することを目的に、三重県地域結集型共同研究事業で開発されたペーパースラッジを主原料とする凝集固化材<sup>4)</sup>について凝集固化材の適用性評価を行い、従来の固液分離・脱水法より低い圧力の脱水技術を開発し、大型処理装置を用いた現地処理実験を通して、高効率な浚渫底泥脱水処理技術の実用化の検証について取りまとめた。

## 2. 凝集固化材の適用性評価

### (1) 凝集固化材の成分

三重県地域結集型共同研究事業では、製紙工場から排出されるペーパースラッジを主原料とする凝集固化材を開発している。この凝集固化剤は高い凝集固化性能を持っている。表-1に基本物性および成分を示す。

表-1 凝集固化材の物性及び成分

| 基本物性 | 主成分                            | 天然木質系焼却灰 |
|------|--------------------------------|----------|
|      | 外観                             | 灰白色粉末    |
|      | かさ比重                           | 0.84g/ml |
|      | pH                             | 8.4±0.5  |
| 成分構成 | CaO                            | 44.2%    |
|      | SiO <sub>2</sub>               | 26.9%    |
|      | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.7%    |
|      | SO <sub>3</sub>                | 12.2%    |
|      | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.2%     |
|      | MgO                            | 1.2%     |
|      | TiO <sub>2</sub>               | 0.8%     |
|      | K <sub>2</sub> O               | 0.4%     |

### (2) 凝集固化機構

凝集機構の特徴として、エトリンガイド結晶の形成があげられる。底泥と混合した凝集固化材は、水和反応によりエトリンガイド結晶を形成する。この結晶は針状の形状であり、この結晶構造の隙間にシルトなどの土壌粒子を保持する。従来の凝集材では高分子の凝集固化材に土壌粒子同士が付着してブロックを形成したが、本凝集固化材は凝集の核にエトリンガイド結晶が存在し、従来の凝集固化材を使用した場合に比べ、再溶解しにくい強固なブロック形成が可能である。写真-1に浚渫底泥に凝集固化材を添加して形成したブロックの破断面の電子顕

微鏡写真(SEM)を示す。写真中央に結晶構造が確認できる。

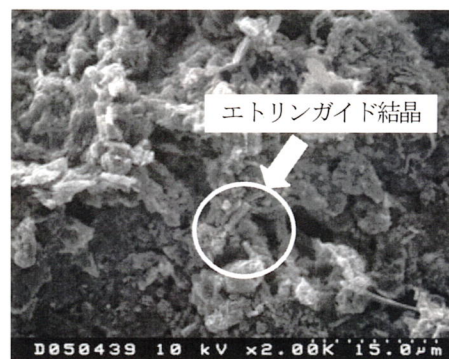


写真-1 ブロック破断面

### (3) 凝集固化材の凝集・固液界面沈降特性

#### a) 実験方法

凝集固化材の浚渫底泥への適用性を評価するため、添加量を変化させ、ブロック形成状況、固液界面の沈降特性、攪拌に伴う再溶解性を評価した。

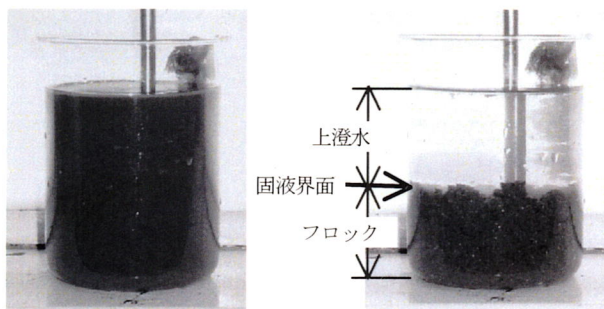
実験には三重県英虞湾片田地区の浚渫事業で採取された浚渫底泥を用いた。500ccビーカーに含水比600%に調整した泥水を入れ、ジャーテスターで攪拌(150rpm)をしながら1～5%(5～25g/500cc)の凝集固化材を添加しブロックの形成状況を目視で観察した。ブロックの形成後にはメスシリンダーに移動し、固液界面の沈降量を30分間にわたり計測した。さらに、ブロックの溶解性を評価するため、メスシリンダー内で攪拌を行い固液界面の沈降量を再計測した。

#### b) 凝集・沈降特性

写真-2に凝集固化材を添加前後の状態を示す。浚渫底泥と凝集固化材が反応し、沈降したブロックと上澄水に固液が明瞭に分離される。ブロックの凝集性を確認するための目視評価としてメッシュ(通気度750cc/cm<sup>2</sup>/sec以上)の上にビーカー内で分離している固液全量をあげ、メッシュを通過するブロックの有無を確認した。

表-2にブロックの形成状況とメッシュの通過性を示す。添加量1%(5g/500cc)では原泥水の一部に細かいブロックの形成が確認でき、添加量2%(10g/500cc)では添加量1%に比べると多量のブロックが形成される。しかし、両者とも固液をメッシュにあけると同時にブロックがメッシュを通過した。添加量3%(15g/500cc)以上では、凝集固化材の周囲に微細なブロックが成長し、最終的に写真-2に示すようなブロック同士が一体化した塊となり、固液が明確に分かれた。このように、強固なブロックが形成される場合、メッシュ上にブロックが残存し上澄水のみが速やかに通過した。添加量1～2%では浚渫底泥中の土粒子に対する添加量が不足し、浚渫底泥全体に凝集固化材が分散する前に凝集反応が終了し、十分に強固なブロックが形成できなかったと考えられる。





凝集固化材添加前（原泥水） 凝集固化材添加後  
写真-2 凝集固化材添加前後の状態 (凝集固化材添加量3%)

表-2 フロック形成状況

| 凝集固化材<br>添加率   | 状況           | メッシュ<br>通過性 | 可<br>否 |
|----------------|--------------|-------------|--------|
| 1% (5g/500cc)  | 一部に微細なフロック形成 | 通過          | ×      |
| 2% (10g/500cc) | 微細なフロック形成    | 通過          | ×      |
| 3% (15g/500cc) | 全体に大型のフロック形成 | 不通過         | ○      |
| 4% (20g/500cc) | 全体に大型のフロック形成 | 不通過         | ○      |
| 5% (25g/500cc) | 全体に大型のフロック形成 | 不通過         | ○      |

### c) 界面沈降特性

凝集固化材の添加及び混合が終了したビーカーから、固液全量をメスシリンダーに移動して沈降量を計測した。また、フロックの溶解性を確認するため、シリンダー内の固液を攪拌して、再び沈降量を計測した。図-1にメスシリンダーに移動後の固液界面の沈降量を、図-2に攪拌後の沈降量の変化を示す。

強固なフロックが形成された3～5% (15～25g/500cc) の凝集固化材添加量では、メスシリンダーへの移動直後に、すみやかに固液界面が10mm以上沈降したが、添加量1～2%では固液界面の沈降が確認できなかった。添加量3～5%では、特に初期3分間の沈降量が大きい。また、添加量3～5%を比較すると、添加量が多いと沈降量が減少する。これは、凝集固化材の添加量に応じてエトリンガイド結晶の形成量が増加し、より強固なフロックの沈降により圧密沈下が妨げられたためと考えられる。

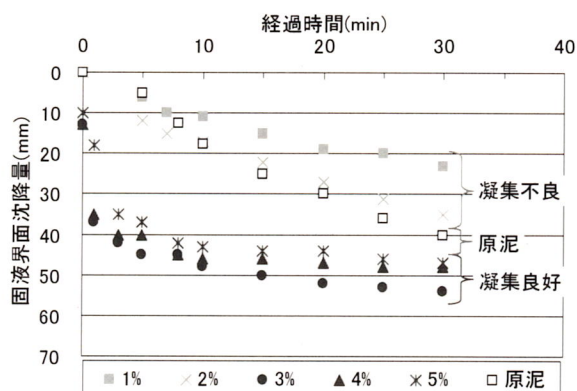


図-1 固液界面沈降量の経時変化

攪拌後の固液界面は攪拌1分後に添加率3%で45mm、4%で35mm、5%で25mmと添加量が多いほど早期に沈降した。こ

のときフロックは上澄水に溶解しなかった。また、固液界面の沈降量の差は、強固なフロックが攪拌後も維持され、圧密沈下が抑制されたためと考えられる。

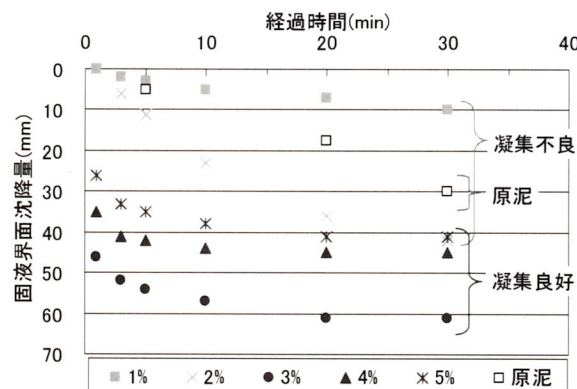


図-2 攪拌後の固液界面沈降量の経時変化

凝集固化材の添加量は、対象とする底泥の含水比、物性等により異なる。ここでは、本実験に用いた浚渫底泥に対する最適な凝集固化材添加量を、メッシュ通過性と沈降速度から検討した。図-3にメスシリンダーにおける沈降速度を示す。メッシュを通過しない良好なフロックを形成した添加量3%以上では、初期10分間の沈降速度が30分間の沈降速度の約2.5倍以上を示した。同様に、攪拌後の沈降速度も初期10分間の沈降速度が速く、ペーパースラッジを主原料とする凝集固化材が、短時間で凝集・沈降するとともに、再溶解特性を持つことが明らかになった。この結果から、本浚渫底泥を対象とした500ccのビーカーによる混合実験では、凝集固化材の添加量は3%以上となった。

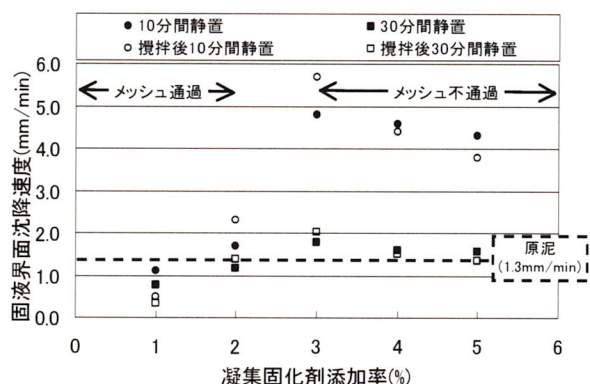


図-3 凝集固化材の添加率と界面沈降速度

## 3. 固液脱水システムの基本設計

### (1) 浚渫底泥脱水処理システムの基本構成

凝集固化材の適用性評価の結果から、凝集固化材は、  
①短時間でのフロック形成、②フロックの良好な沈降特



性、③強固なフロック性状、④再分散の抑制、などの特徴が明らかとなった。これらの特徴を活かし、人工干潟土壤に求められる「干潟造成地域までダンプ等で搬送可能」、「砂質土と混合が可能」、「干潟で分散・再溶出しない」機能を満たす脱水ケーキを製造する方法として、一次処理(凝集・沈殿・排水・濃縮)、二次処理(脱水)を組合わせた、2段階方式の浚渫底泥脱水処理システムを開発した(図-4)

#### 一次処理装置

従来の方式では凝集材の反応と、時間を要するフロックの沈殿を異なる処理槽で行っている。本方式では同一の水槽内で凝集固化材と含水比500%以上の泥水状態の浚渫底泥を混合し、短時間のフロック形成と良好な沈降特性を活かしてフロックを形成・沈降させる。また、固液界面より上の上澄水を排水し、フロックの含水比を低減して濃縮する。

#### 二次脱水装置

一次処理装置で含水比の低下した濃縮フロックから、さらに間隙水を排除して含水比を低下させるため、強固なフロックの性状を活かし、透水性の高いメッシュベルトで連続して固液の脱水を行う。メッシュベルトによる脱水は0.02MPa程度の低い圧力でフロックの間隙水のみを排水する機構とした。

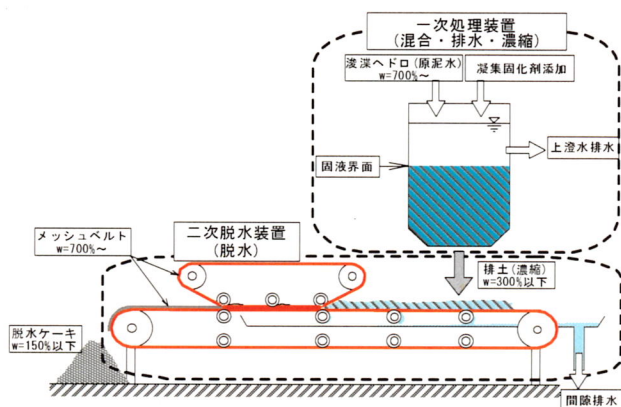


図-4 装置の基本構成

### (2) メッシュの選定及びベルト転圧条件の設計

#### a) 実験装置及び実験条件

装置の基本設計にあたり、脱水ケーキの含水比に影響する二次脱水装置について、実験架台を用いてメッシュベルトの材質、および、メッシュベルトの転圧条件を検討した。実験手順を図-5に、メッシュベルトの実験装置を図-6に示す。メッシュベルトは表-3に示す通気度が異なる3種類のポリエチレン製メッシュを用意し、実験架台に設置した。実験には三重県英虞湾立神地区の海底から直接採取した底泥を含水比1000%に調整し、1条件あたり3Lの原泥水を用いた。実験に使用した底泥について、あらかじめビーカー実験により凝集固化材の添加量を評価した。使用した底泥の採取場所が異なり、また、含水比が高いため(土粒子の濃度が低い)、凝集固化材の適用

性評価で最適とされた添加量に比べ少量の1.5%の添加量で、良好なフロック形成が確認できた。実験では泥水量に対し1.5~2.0% (45g~60g/3L)の添加量を設定した。

表-3 ポリエチレンメッシュによるフロックの通過性

|                              | メッシュ名称  |         |         |
|------------------------------|---------|---------|---------|
|                              | A       | B       | C       |
| 材質                           | ポリエチレン  |         |         |
| 通気度(cc/cm <sup>2</sup> /sec) | 104     | 284     | 750以上   |
| 引張強度(kN/3cm)<br>(縦糸/横糸)      | 3.6/1.8 | 2.4/0.9 | 2.5/1.1 |
| 目合                           | 密       | 中       | 粗       |

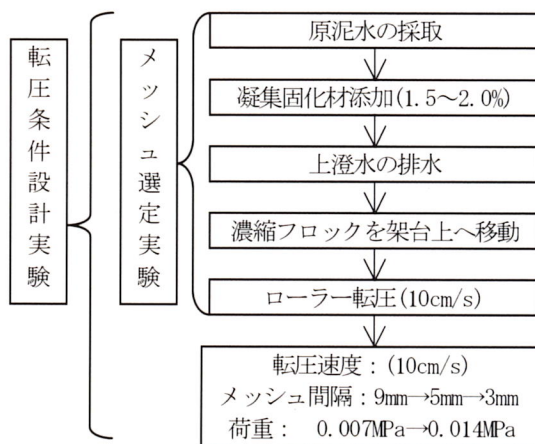


図-5 実験手順

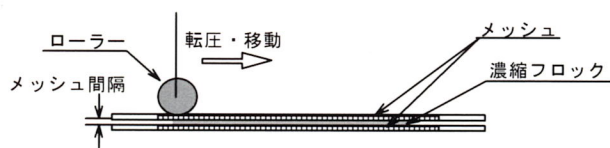


図-6 実験架台断面図

#### b) メッシュの選定

装置の大型化に対応できる強度を持つ3種類のメッシュについて、濃縮フロックをメッシュで上下から挟み、ローラーによる転圧(0.014MPa)を行い、フロック自体のメッシュ通過状況を調査した。いずれの凝集固化材の添加量でも良好なフロックが形成された。A,Bでは転圧に伴うフロックの通過は観察されず上澄水のみがメッシュから排水されたが、目合が最も粗であるCではフロックの一部が上澄水および間隙水とともにメッシュを通過した。

#### c) ベルト転圧条件の設計

メッシュベルトの転圧条件を設計するために、良好な脱水性が見られたA,Bについて実験を行った。転圧10回を1セットとして、1セット毎にメッシュの挟み込み厚さ(メッシュ間隔)を狭め、脱水後のフロックの含水比を計測した。図-7に転圧に伴う含水比の減少率を示す。いずれの条件でも転圧回数が増加すると含水比が低下し、フ



ロックの間隙水が排水されている。含水比の減少量はベルト移動直後に比べ転圧3セット後で73～86%であり、凝集固化材の添加量が多いほど含水比の減少量が小さく、間隙水の排水性が低くなる傾向である。メッシュの目合で比較すると、目合が大きく通水性が高い条件で含水比は多量に減少する。したがって、二次脱水装置を効率よく稼働させるためには、ブロックの性状、強度に適したメッシュを選定することが必要である。

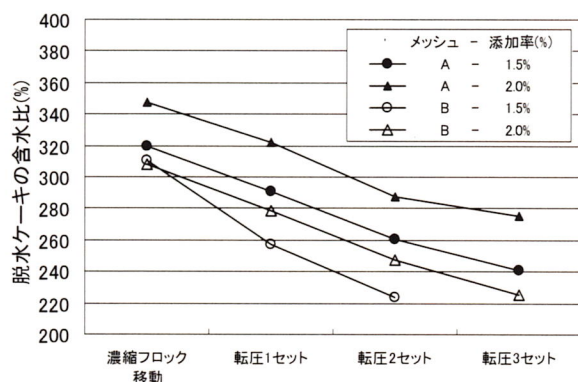


図-7 凝集固化材添加量と脱水ケーキの含水比  
(メッシュ間隔一定、荷重1.4N/cm<sup>2</sup>)

#### d) 大型処理装置の設計条件のまとめ

以上の基礎実験から、処理システムに必要となる基本条件を決定した。材料の選定にあたっては、コストと汎用性を考慮して決定した。メッシュベルトは基礎実験で良好な排水性を示したポリエチレン製メッシュのBタイプを選定した。また1時間に1.5m<sup>3</sup>の処理目標を設定し、含水比700%の原泥水の脱水処理を行う二次脱水装置の諸元(メッシュベルト幅0.9m、長さ10m、稼動速度5～10m/分)を決定した。

## 4. 現地処理実験による検証

### (1) 実施概要および実験条件

実規模スケールの処理装置を設計するために、大型処理装置を製作し、実際の浚渫底泥を用いて原底泥の含水比、凝集固化材の添加量、メッシュベルトの間隔等の条件を変化させた現地処理実験により実用性を検証した。

現地実験は三重県英虞湾立神地区で2005年9月に実施した。原泥は同時期に波切・立神地区浚渫工事で発生する浚渫底泥の一部を使用した。浚渫底泥を30m<sup>3</sup>貯留タンクに保管し海水で含水比を希釈・調整し、のべ70m<sup>3</sup>の処理実験を行った。図-8に示すように原泥は砂分が除去された、シルト・粘土含有率が99%に達する非常に微細な粒子で構成される泥水を使用した。

大型処理装置を写真-3に示す。装置は凝集固化材の添加、ブロックの形成・沈降および上澄水の排水を行う1.5m<sup>3</sup>容量の一次処理装置と、メッシュベルトで濃縮フ

ロックを連続脱水する二次脱水装置で構成した。二次脱水装置中央部(約5m)で上下からローラーのみの圧縮力により濃縮ブロックを挟み込んで間隙水を排水する機構とした。処理能力は最大1.5m<sup>3</sup>/バッチとした。

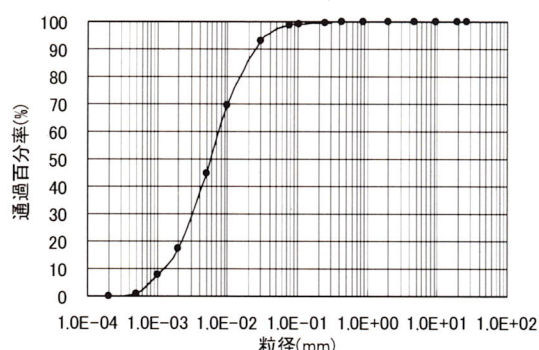


図-8 原泥の粒度分布



写真-3 大型処理装置

実験条件として、原泥水の含水比、凝集固化材添加率、メッシュベルトの間隔などを変化させた(表-4)。なお、メッシュベルトの間隔は濃縮ブロックの排出口を上流、脱水ケーキ排出口を下流として、出口に近づくほど狭くなる構造とした(図-9)。

表-4 実験条件

| 条件種別            | 範囲        |
|-----------------|-----------|
| 原泥水含水比          | 620～1200% |
| 凝集固化材添加率:       | 1.5～4.0%  |
| メッシュベルトの間隔(上流側) | 5.0～20mm  |
| メッシュベルトの間隔(下流側) | 0.0～5mm   |

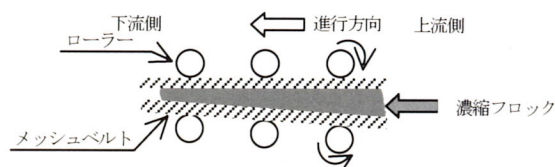


図-9 メッシュベルト断面図

### (2) 実験結果

凝集固化材の添加率と含水比は、添加率2%以上で含水比が170%以下まで減少し、添加率3%で最も低い含水比である141%を示す脱水ケーキが排出された。



実工事において原底泥の含水比は変動している。図-10, 11に示すとおり、原泥水の含水比が620～1200%であるのに対して、脱水ケーキは添加率2%で含水比は160～180%まで低下しており、原泥水の含水比の変動に対応した処理が可能であることを実証した。添加率2%の条件では原泥水の容量が60～80%大幅に減容化されて排出された。また、浚渫底泥のハンドリングに影響する脱水ケーキの強度は、脱水直後の時点で写真-4、写真-5に示すように自立し、重機による移動が可能であった。また、脱水ケーキを14、28日風乾後の一軸圧縮強度試験を行った結果、添加率にかかわらず、14日で6～10kN/m<sup>2</sup>、28日で20～28kN/m<sup>2</sup>の強度が出現し、重機によるハンドリングが十分に可能な圧縮強度を達成した(写真-4, 5)。



写真-4 脱水ケーキ



写真-5 重機による搬送

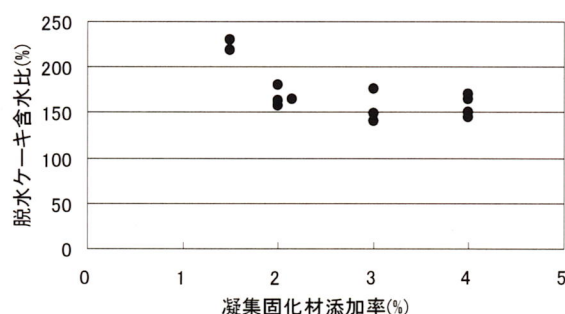


図-10 凝集固化材の添加率と脱水ケーキの含水比

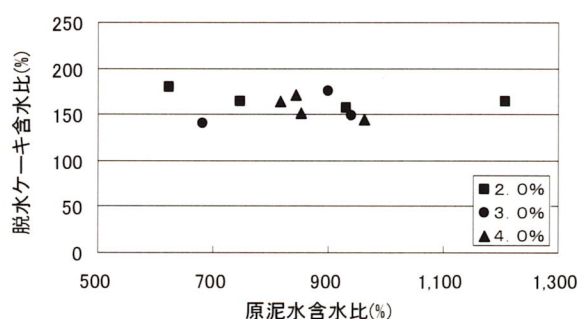


図-11 原泥水の含水比と脱水ケーキの含水比

### (3) 施設規模と処理コストの試算

実証実験の結果をもとにして、実規模スケールに対応する50m<sup>3</sup>/hrの処理設備を設計した(図-12)。同一の水槽で凝集材の混合と固液分離を行い、6m/min以上の速度で処理を行う脱水処理装置を用いた高効率の処理設備により、処理コストは従来比約10～20%、処理ヤードは30%の低減が可能となった。

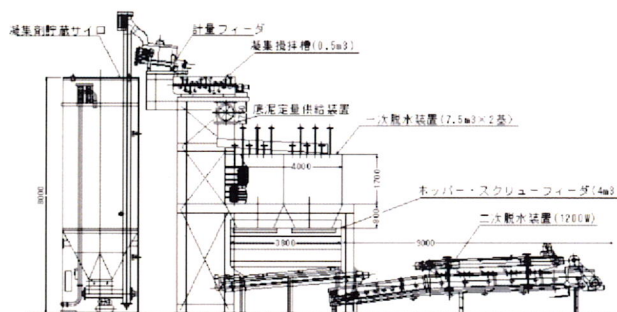


図-12 実規模処理設備(50m<sup>3</sup>/hr)

## 5. 結論

浚渫底泥を資源循環型の干潟土壌に利用するため、ペーパースラッジを主原料とする凝集固化材を利用した脱水処理技術を開発し、実用化の検証を行った。以下に結論をまとめる。

### (1) 凝集固化材の適用性

ペーパースラッジを主原料とする凝集固化材は、短時間でのブロック形成、ブロックの良好な沈降特性、強固なブロック形成、再分散しないブロック形成が可能であり、既存の脱水ケーキと異なり干潟土壌へ混合する脱水ケーキに非常に適した特徴を有している。

### (2) 脱水処理システムの設計と現地実験による検証

凝集固化材の特徴を活かし、浚渫底泥と凝集固化材の混合および固液分離を同一の水槽で行うとともに、通水性の高いメッシュベルトにブロックを挟み込むだけで含水比150%以下の脱水ケーキが排出できることを、大型処理装置を用いた実験により実証した。また、実規模スケールの処理設備を設計し、従来法に比べコストを低減する処理方法であることを明らかにした。

## 参考文献

- 1) 国分秀樹, 奥村宏祐, 上野成三, 高山百合子, 湯浅城之: 英虞湾における浚渫底泥を用いた干潟造成実験から得られた干潟底質の最適条件, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1191-1195, 2004.
- 2) 国分秀樹, 奥村宏祐, 上野成三, 高山百合子, 湯浅城之: 英虞湾における浚渫ヘドロを用いた大規模造成干潟の底質と底生生物の特性について, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1196-1200, 2005.
- 3) 片倉徳男, 高山百合子, 上野成三, 小林峯男, 国分秀樹, 奥田圭一: 浚渫ヘドロを用いた干潟再生工法におけるヘドロ混合の設計・施工計画, 海洋開発論文集, 第21巻, pp. 885-890, 2005.
- 4) 片倉徳男, 上野成三, 小林峯男, 今井大蔵, Ahmed H. A. Dabwan, 前川憲治: 新規土壌安定改良材を利用した浚渫ヘドロの簡易固液分離に関する検討, 第60回年次学術講演会講演概要集, 7-099, 2005.