

# 浚渫泥土の分離堆積

## Segregating sedimentation of pump-dredged clayey materials in reclamation

や の こう いち ろう つる や かず お  
 矢 野 弘 一 郎\* 鶴 谷 和 夫\*\*  
 やま の うち とよ とし  
 山 内 豊 聡\*\*\*

表一 実験に採用した粒径区分と記号

| MIT | 分類名    | シルト   |       |                 |                | 砂               |                |    |
|-----|--------|-------|-------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|----|
|     | 粒径(mm) | 粘土    | 細粒    | 中粒              | 粗粒             |                 |                |    |
|     |        | 0.002 | 0.006 | 0.02            | 0.06           |                 |                |    |
| JIS | 分類名    | コロイド  | 粘土    | シルト             |                | 砂               |                |    |
|     | 粒径(mm) | 0.001 | 0.005 | 0.074           |                |                 |                |    |
| 実験  | 分類記号   | COL   | CL    | SI <sub>f</sub> |                | SI <sub>c</sub> |                | SA |
|     | 粒径(mm) | 0.001 | 0.005 | S <sub>1</sub>  | S <sub>2</sub> | S <sub>3</sub>  | S <sub>4</sub> |    |
|     |        | 0.001 | 0.005 | 0.01            | 0.02           | 0.04            | 0.074          |    |

### 1. はじめに

近年、日本における浚渫埋立工事は埋立地を軟弱な粘土やへどろの土砂処分地として利用したものが多い。主に細粒土からなる海底土をポンプ船で浚渫し埋め立てる場合、水面上にスラリー状で投入される浚渫土の埋立地内における堆積状態は、粗粒土が分離しながら沈降するもの

と、細粒土が流送される間に分離分級されフロックを形成して沈降するものがある。その結果、埋立地盤を構成する粒度組成は浚渫地盤と異なったものとなり、大略、次のように区分することができる。すなわち、浚渫土を投入する付近に粗粒土が堆積し、ほかの大半は海水と混合された高含水比の細粒土で占められる<sup>1)</sup>。この細粒土地盤の特性を知るために、埋立工事計画に際して、浚渫予定地から採取した土に海水を加え泥水となし、沈降実験や沈降堆積土の力学試験が行われている。本報告は泥水中の土粒子が沈降堆積する時に分離分級されて構成する土粒子径の分布特性を実験により求め、埋立地内に堆積する細粒土の粒度組成を予測した。この結果は、浚渫地区の採取土から埋立地盤を予測するために供すべき試料を決めるのに利用することができる。

### 2. 沈降時に分離する土粒子径

#### 2.1 実験内容

土粒子の名称はその等価粒径によって粘土・シルト・砂・礫に区分されるが、各粒径範囲は各国の規格によって異なっている。海面埋立工事における粒度分離に関する適切な粒径区分を求めるために、JISに規定されている粒径区分のシルトを更に4分割した区分で土性の違う各種の細粒土について沈降堆積時に分離して深度方向に分布の変化する粒径を調べた。

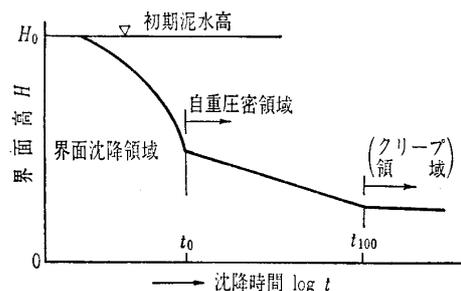
実験で区分した粒径および記号は表一に示すように他規格と比較して決めた。

#### 2.2 試料調製

実験に供した試料は海底より採取したものを2000μmふるいで裏ごししたものを使用した。泥水中における土粒子の沈降現象は主に泥水濃度、塩分量、粘土鉱物の種類によって異なるので、ポンプ船で軟弱な沖積粘土を浚渫する場合の平均的な条件を考慮して、試料土を比重1.023の海水に混合して含水比100%に調整した。なお、含水比の計算には塩分質量を土粒子質量に含めない補正を行っている<sup>2)</sup>。

#### 2.3 泥水の沈降および供試体採取

調製した泥水の沈降は内径12cmの透明なアクリル製シリンドラーを用い、初期泥水高を1mとした。このような高含水比の泥水は、一般に図一に示す沈降と自重圧密過程を経るが、本実験における試料採取時の堆積状態は自重圧密が進行し、そのクリープ領域に入る時間( $t_{100}$ )<sup>3)</sup>まで静置したものとした。試料の採取方法は図二に示す試料押出し機を使用してシリンドラーから押し出し、層別の試料を採取した。なお、これらの試験は20℃の恒温室で行った。



注)  $t_0$ : 自重圧密開始時間  
 $t_{100}$ : 自重圧密終了時間

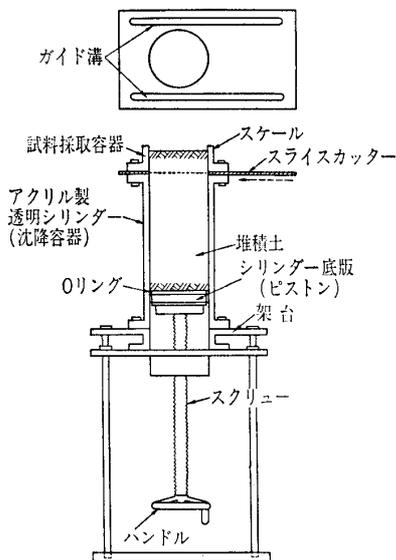
図一 干渉沈降における沈降曲線

\*五洋建設機技術研究所 副所長  
\*\*五洋建設機技術研究所 主任  
\*\*\*九州大学教授 工学部水工土木科

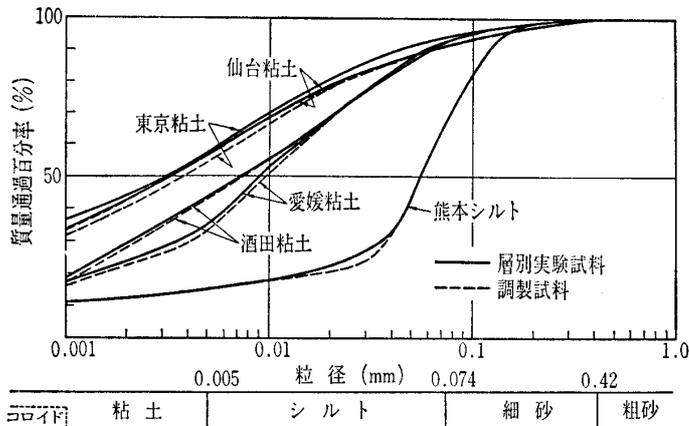
表一2 試料土の特性

| 試料    | 堆積土高 $H_f$ (cm) | 沈降時間(h)           | 比重 $G_s$ | 液性限界 $w_L$ (%) | 塑性限界 $w_p$ (%) | 塑性指数 $I_p$ |
|-------|-----------------|-------------------|----------|----------------|----------------|------------|
|       |                 | $t$ ( $t_{100}$ ) |          |                |                |            |
| 仙台粘土  | 34.0            | 358 (283)         | 2.557    | 118.7          | 33.8           | 84.9       |
| 東京粘土  | 27.5            | 525 (260)         | 2.657    | 95.5           | 34.5           | 61.0       |
| 酒田粘土  | 28.0            | 332 (200)         | 2.503    | 94.0           | 43.2           | 50.8       |
| 愛媛粘土  | 15.0            | 143 (73)          | 2.808    | 47.1           | 24.2           | 22.9       |
| 熊本シルト | 15.0            | 217 (40)          | 2.695    | 31.6           | 25.2           | 6.4        |

スライスカッター平面図



図一2 液状粘土の押し出し機とスライスカッター



図一3 試料土の粒径加積曲線

2.4 試料土

表一2は沈降堆積土をシリンダーから抜き出す時点の堆積土高( $H_f$ ), 沈降時間( $t$ )および自重圧密終了時間( $t_{100}$ ), と調製試料の物理試験結果を示している。図一3の粒径加積曲線は層別試料の各粒径加積曲線を合成した試料土の粒度組成である。この実線で表した曲線が実験に供した土の粒度組成と考えられ、あわせて別途に行った調製試料の粒度試験結果(破線)とは若干の差がある。

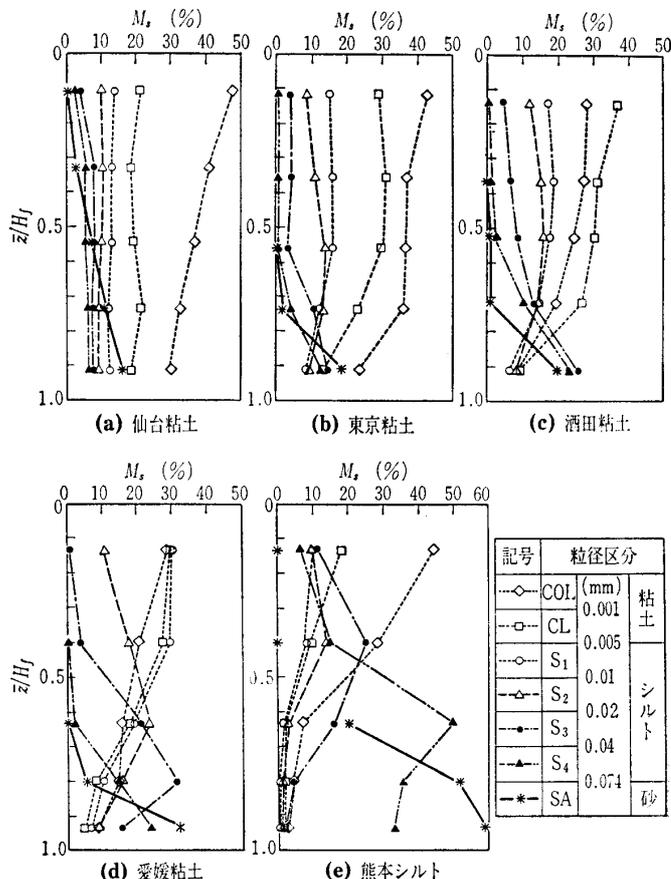
2.5 堆積試料の粒度分布

図一4(a)~(e)は沈降堆積した土を5層に分割した試料について JIS A 1204 による粒度試験を行い、前述の粒径区分による土粒子質量百分率  $M_s$ (%) を深度ごとにプロ

ットしたものである。 $z$ は分割試料の中心深度であり、縦軸の深度は無次元化してある。

土粒子群の分離を「土粒子が一樣に懸濁した泥水の沈降過程において、粗粒分が早く沈降し下層部に多く堆積する現象」と定義すると、図一4から次の特徴が指摘される。

- i) 砂は深度方向に増加し、すべての試料で分離する。塑性指数( $I_p$ )の高い仙台粘土は上層部にも砂を捕そくしている。ほかの試料についてもごく少量の砂を上層部に含有しているが、 $I_p$ の低い粘土に含まれる砂は下層に分離堆積すると考えてよい。なお、上層部に含まれている砂粒径のものには貝殻碎片や木片などを多く混入している。
- ii)  $I_p$ の小さい愛媛粘土および熊本シルトに含まれる粗粒のシルトは、顕著に分離して下層への堆積量が多くなっている。最下層で粗粒シルトの堆積量が見かけ上減少しているものは、砂分の占める率が多いためである。また、 $I_p$ の高い試料ほど分離の程度は小さくなっている。
- iii) 0.01 mm 以下の粒径のシルト  $S_1$  は全試料について分離傾向が見られない。
- iv) このような含水比における粒度分離をする平均的な粒径の境界は、シルトのうちの粒径範囲  $S_2 \sim S_3$  にある。土の性質によって分離する粒径には若干の差があるが便宜的に粒度分離の粒径区分として、粒径 0.005~0.02 mm



図一4 各粒径区分の質量百分率 ( $M_s$ ) ~ 深度 ( $z/H_f$ )

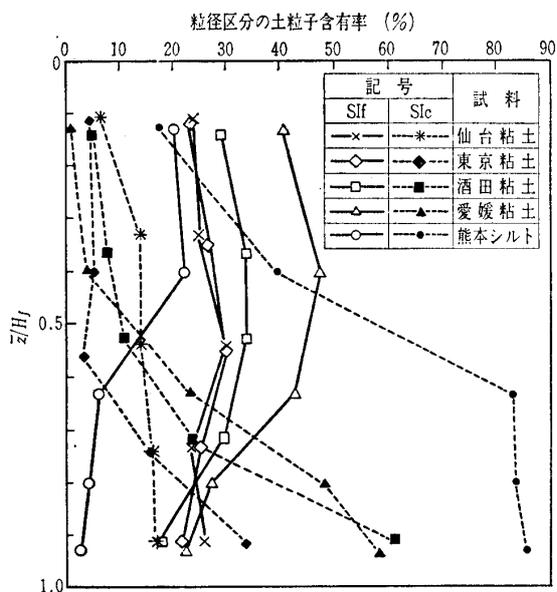


図-5 細粒シルトおよび粗粒シルトの分布

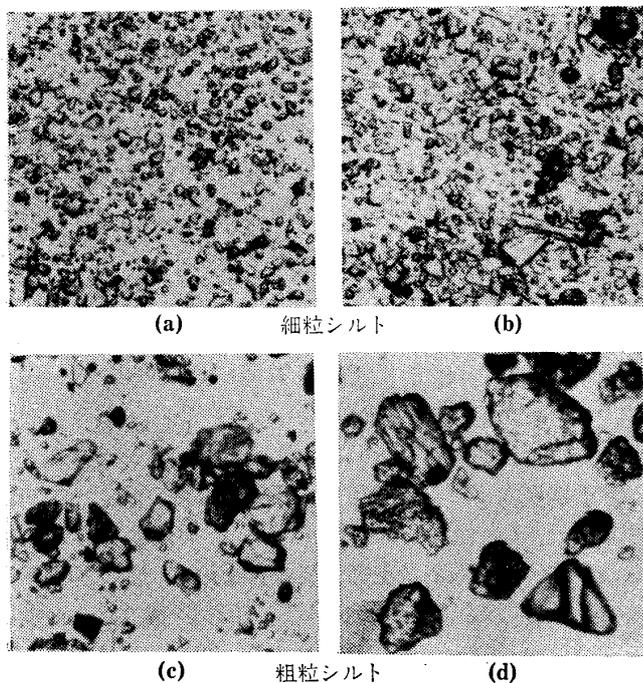


写真-1 東京粘土のシルト形状

(S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>)を細粒シルト(SI<sub>f</sub>), 粒径0.02~0.074 mm (S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>)を粗粒シルト(SI<sub>c</sub>)に分類した。図-5は砂分を除いた土の質量を100%として計算したSI<sub>f</sub>とSI<sub>c</sub>の深度分布

を示しており、粒径0.02 mmを境界として深度方向の分布が異なるので分離に関する粒径の指標を0.02 mmとする。

図-4(b)に示したように東京粘土は粒径0.02 mmを境とした分離が明りょうに現れている。この試料について別途に行った粒度試験の沈降試料を深度別に顕微鏡で撮影したものが写真-1であり、0.02 mm付近の粒径を境に粒子形状の差が認められる。写真-1(a)~(d)は分離堆積した試料を2 mm厚にスライスして撮影した連続写真である。

### 3. 分離細粒土の粒度特性

#### 3.1 沈降過程における粒度分離

沈降過程については前述(図-1)のとおりであるが、各沈降過程で深度方向への粒径分布の移動を確認するために、時間を変えて深度別の粒度試験を行った。実験方法は2.2, 2.3に準じt<sub>0</sub>までの試料採取は真空ポンプで吸引した。沈降過程における各堆積試料高は異なるので、深度別の粒度の比較は堆積試料から層別に採取した土の各土粒子実質高さで行った。なお、各シリンダーに入れる試料の土粒子実質高H<sub>s</sub>はある程度の差が生ずるので、H<sub>s</sub>=1とした深度方向の土粒子実質高比で表した。試験結果の整理は、沈降過程にある堆積試料をn層に分割した各試料について行った試験結果により、以下の計算を行った。

$$\Delta H_{sn} = \frac{\Delta H_n}{1+e_n} = \frac{\Delta H_n}{1 + \frac{G_{sn} \cdot w_n}{\rho_w \cdot 100}} \dots\dots\dots(1)$$

$$\Delta H_{rn} = \frac{\Delta H_{sn}}{\sum \Delta H_{sn}} \dots\dots\dots(2)$$

$$H_{s\bar{z}n} = \sum_{n=1}^{n-1} \Delta H_{rn} + \frac{1}{2} \Delta H_{rn} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、ΔH<sub>sn</sub>: 第n層の土粒子実質高(cm), ΔH<sub>rn</sub>: 第n層の全層に対する土粒子実質高比, H<sub>s $\bar{z}$ n</sub>: 第n層中央深さまでの堆積土上面からの土粒子実質高比(表面から深さzまでの土粒子質量の全質量に対する比), ΔH<sub>n</sub>: 分割層厚(cm), G<sub>sn</sub>: 土粒子比重, w<sub>n</sub>: 塩分補正した含水比(%), e<sub>n</sub>: 間隙比, ρ<sub>w</sub>: 水の密度(海水1.023 g/cm<sup>3</sup>)である。

全試料の平均粒度分布は層別試料の各粒度試験結果を合

表-3 層別試料採取時の沈降過程と粒度組成

| 試料    | 記号          | 沈降過程              | 沈降時間(h) | 粒度組成(%) |      |                 |                 |                 |                 | 土粒子比重 |       |  |          |  |
|-------|-------------|-------------------|---------|---------|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|-------|--|----------|--|
|       |             |                   |         | 0.001   |      | 0.005           |                 | 0.02            |                 |       | 0.074 |  | 0.42(mm) |  |
|       |             |                   |         | COL     | CL   | SI <sub>f</sub> | SI <sub>c</sub> | SA <sub>f</sub> | SA <sub>c</sub> |       |       |  |          |  |
| 東京粘土  | .....●..... | <t <sub>0</sub>   | 4.5     | 30.8    | 21.8 | 22.9            | 15.8            | 8.3             | 0.4             | 2.653 |       |  |          |  |
|       | .....×..... | t <sub>0</sub>    | 7.2     | 32.0    | 22.6 | 24.3            | 13.9            | 6.8             | 0.4             | 2.651 |       |  |          |  |
|       | .....○..... | >t <sub>100</sub> | 525     | 33.6    | 23.9 | 23.7            | 12.9            | 5.5             | 0.4             | 2.658 |       |  |          |  |
| 熊本シルト | .....●..... | <t <sub>0</sub>   | 1.0     | 14.3    | 2.0  | 4.4             | 42.7            | 36.2            | 0.4             | 2.694 |       |  |          |  |
|       | .....×..... | t <sub>0</sub>    | 3.2     | 11.1    | 2.2  | 5.3             | 43.7            | 37.7            | 0               | 2.695 |       |  |          |  |
|       | .....○..... | >t <sub>100</sub> | 217     | 11.3    | 4.3  | 6.8             | 43.8            | 33.8            | 0               | 2.693 |       |  |          |  |

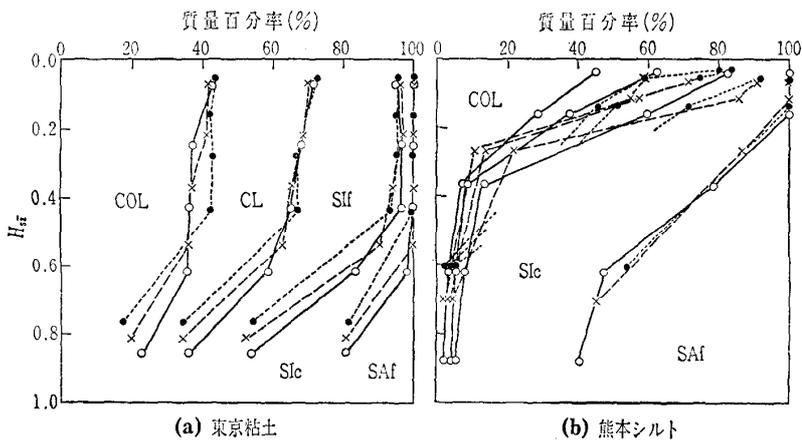


図-6 沈降過程における粒度の深度分布 注) 記号は表-3

成して(4)式にて計算で求めた。

$$M_s = \sum M_{sn} \cdot \Delta H_{rn} \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $M_s$  : 全試料に対する各粒径区分の土粒子質量百分率、 $M_{sn}$  : 第  $n$  層の各粒径区分の土粒子質量百分率。

表-3 は層別試料を採取したときの堆積土の沈降過程(時間)と各試料の(4)式より求めた粒度組成である。この実験試料は混合かくはんした一つの試料から三つに分割調製したものであるが、粒度組成に多少の差がある。図-6 は沈降過程における粒度の深度分布を比較したものであるが、試料土自体のばらつきもあるので、実験範囲では顕著な差はないと言える。すなわち、粗粒分の分離は沈降開始

後の早い時間に生ずる<sup>4)</sup>ことが分かり、少なくとも自重圧密開始後 ( $t_0$  以降) では土粒子間の相対的な移動はないと見なされる。また熊本シルトの結果は、S1c 以上の粗粒分が分離堆積することを明確に表現している。

沈降時に粒度分離して下層に堆積する粗粒土の密度は、フロックを形成して堆積する細粒土の密度に比して大きくなる。この特性から粒度分離状態を調べるために、堆積土の深度と土粒子実質高比  $H_{sz}$  の関係を示したものが図-7 である。横軸を  $H_{sz}$  と  $\sqrt{H_{sz}}$  で表した場合の勾配が急増し、最大曲率を示す点となる  $z/H_f$  は同一とみなされるが、最大曲率点判別の優劣は実験データによって異なるので、同一データを二つの曲線で表示している。なお、 $z$  は層別試料の下面深度である。 $z/H_f \sim H_{sz}$  曲線に現れる最大曲率点の深度は図-6 の粗粒分が急増する深度と同等の  $H_{sz}$  であることから、図-7 の結果で粒度分離深度を求める指標とすることができる。沈降時間が  $t_0$  以下  $\sim t_{100}$  の試料状態において、同一試料に対する粒度分離を図-7 の最大曲率点で比較すると、ほぼ同じ  $H_{sz}$  に最大曲率点があり、この沈降状態の範囲では分離する  $H_{sz}$  は同等である。

3.2 分離試料による再堆積  
層厚 1 m の愛媛粘土泥水をシリンダーの中で沈降させ、沈降時間が  $t_0$  のときに(層厚 21.5 cm)、0~4~8~16~21.5 cm の深さ別に試料を採取し 5 層に分け、これをそれぞれ含水比 100% に調整して再沈降させ、自重圧密がクリープ領域に入ったのを確認して各堆積試料の深度~含水比分布を調べた。結果を  $z/H_f \sim H_{sz}$ 、 $w$  の関係で整理したものが図-8 である。上部 3 層の含水比は、深度変化が少なく  $z/H_f \sim H_{sz}$  にも最大曲率点が現れず再沈降過程での分離はない。下部 2 層は再分離し、第 4 層試料は  $H_{sz} \approx 0.55$ 、第 5 層試料は  $H_{sz} \approx 0.15$  に分離点がある。以上の結果から、

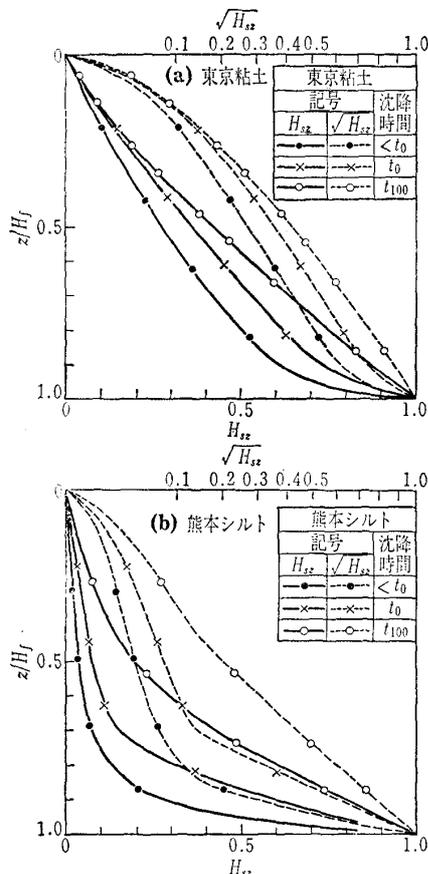


図-7 堆積土の深度と土粒子実質高比の関係

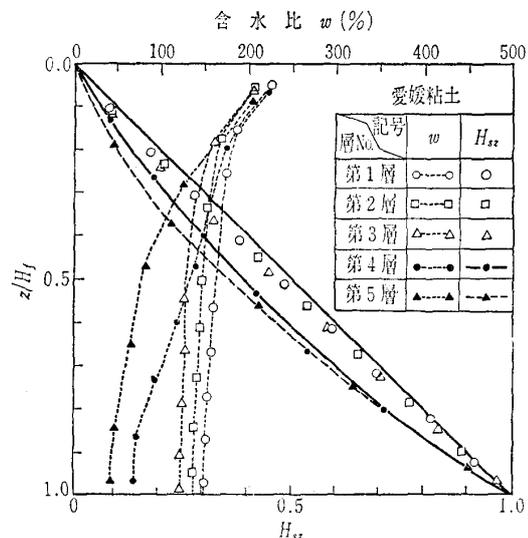


図-8 分離試料による粒度の再分離

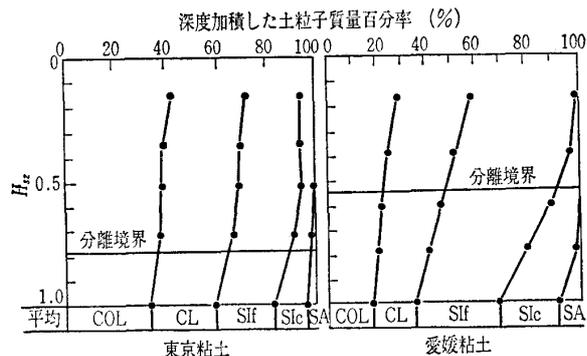


図-9 深度加積した粒度分布

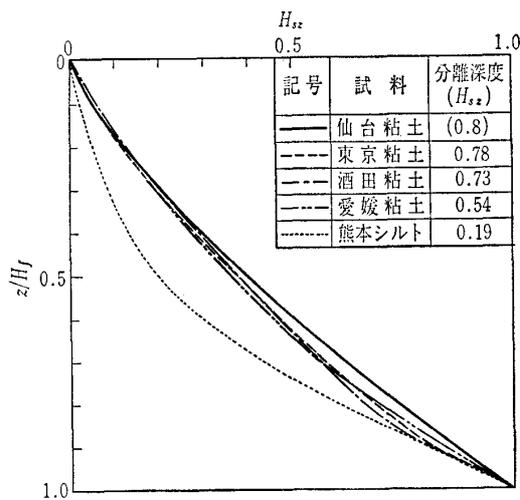


図-10 z/Hf ~ Hsz 分離深度

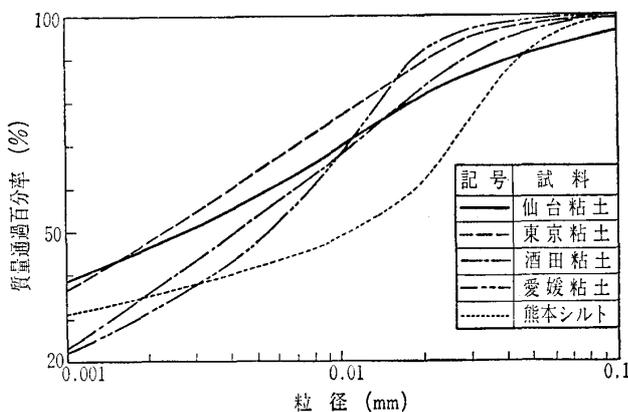


図-11 分離細粒土の粒径加積曲線

一たん、分離した細粒土は、同じ条件下における再沈降ではもはや分離しない。

3.3 分離堆積する細粒土の粒度組成

埋立地には、浚渫地盤に含まれる粗粒土が逸脱した高含水比の細粒土が大きな体積となって堆積するが、その細粒土の粒度組成を予測する方法として、今までに述べた層別試料による粒度試験結果を用い粒度分布を深度方向に加積した図を作成した。図-9は、図-4(b), (d)のデータから作成したもので、この図からも SIc 以上の粗い粒径のものが急増する境界の Hsz で、図-4にさかのぼって深

度を求めると分離深度が決まる。この境界面の Hsz における図の粒度 (その Hsz までの平均粒度を示す) が埋立地に堆積する細粒土組成に近いものと推定される。

図-10は沈降時間を t100 以上とした各試料 (図-4) の z/Hf ~ Hsz の関係を示している。また分離深度の Hsz は、それぞれの試料に対する図-9の関係を参考に記入してある。なお、仙台粘土の分離深度は明確ではないが Ip の高いことに起因しているものと思われる。

分離する Hsz が求めれば、前述の深度加積した粒度分布図で分離深度点における粒度組成が推定する細粒土地盤の粒度である。図-11は以上のようにして求めた各種試料の分離細粒土の粒径加積曲線である。

4. 埋立現場を対象とした実験と調査例

4.1 埋立概要

東京湾横須賀の埋立工事において現場と室内実験の対応を試みた。埋立地は図-12に示すように海面を護岸で締め切り、更に中仕切堤を有する平面形状となっている。

埋立地への土砂投入状態は、初期においては海面上からスラリー状の土を海中に投入し、埋立面の上昇とともに最終的にはスラリー土は埋立面に直接投入された。また浚渫土には排砂管から有機系凝集剤を注入している。

浚渫地盤は層厚 2.5m 以下で、粘土地盤と砂地盤に平面的に分かれて分布している。工事は比較的小規模なもので、ポンプ船能力 600 PS, 浚渫土量 73 400 m³, 埋立面積 24 600 m², 埋立期間31日で施工された。

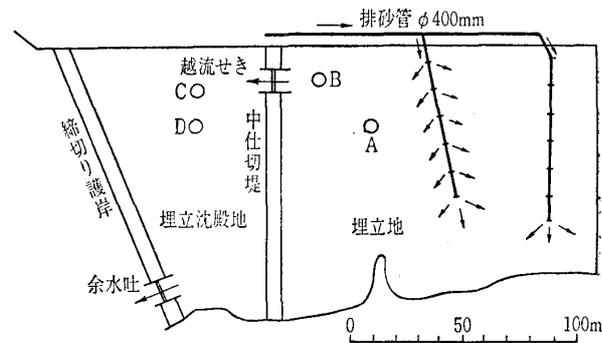


図-12 埋立平面および調査地点

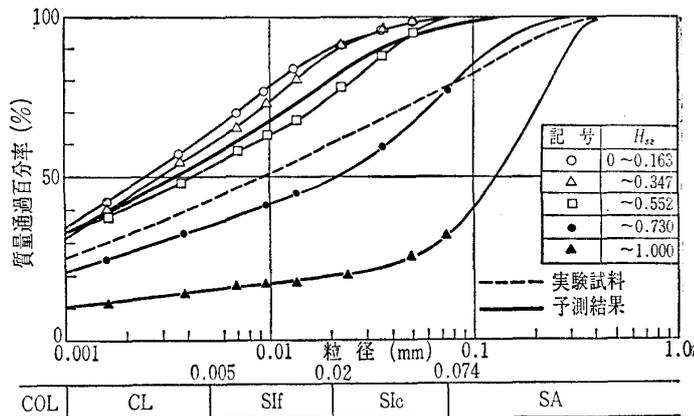


図-13 分離堆積試料の粒径加積曲線

4.2 分離堆積実験

(1) 実験方法

本実験においては、今までに述べた実験方法を埋立工事の条件に合うように一部変更した。試料は浚渫地区の細粒分の多い地域から工事着工前に採取した土を0.42mmふるいで裏ごしし、海水で現場の設計含水比100%に調整した。工事では泥水が海面上から水中に投入されるので、実験では高さ2mのシリンダーを使用してまず1mの高さまで海水を入れ、管の上から泥水をシャワー方式で静かに入れて全量が2mになるようにした。なお、泥水投入直前に現場と同じ条件の有機系凝集剤2ppmを泥水に添加し1分間かくはんした。

(2) 実験結果

沈降曲線からみた自重圧密開始時間 $t_0$ は5.2hであり、層別試料は沈降時間23h( $<t_{100}$ )で採取したものである。

図-13は破線で示す粒度の実験試料の沈降後の深度別の粒度分布である。堆積試料の分離深度は図-14(a), (b)の二つの図からほぼ同じ値が得られており $H_{sz}=0.63$ である。図-13に、細粒土として堆積するであろう粒度は図-14から求めたものを太線で記入している。

(3) 埋立地細粒土の粒度分布

現場の条件は、埋立地面積が小さく浚渫地盤にも砂分を多く含有していた。したがって細粒土が広く堆積する条件に欠けるところもあるが、細粒土の多く堆積する越流せきに近い位置(A, B点)と埋立沈殿地(細粒分の沈殿池)の堆積土(C, D点)を採取し粒度試験を行った。

図-15は埋立地および埋立沈殿地に堆積した細粒土と浚渫地盤の粒度組成を示している。図中の点線は浚渫地盤から工事前に採取した土の粒度組成であるが、平面位置による粒度の差が大きい地盤である。図-13の実験に用いた試料は浚渫地盤で細粒土が多く堆積している地点から採取したものであり、図-13で予測した分離堆積する細粒土の粒度組成は埋立地A, B, 埋立沈殿地C, Dのものと同様なものとなっている。なお、浚渫土の投入口に近いA点には薄層状に細砂が流入している。

5. おわりに

ポンプ浚渫土が埋立地に堆積するときに、分離堆積する細粒土の粒度組成を予測した。分離堆積する細粒土の粒度組成は浚渫地盤から採取した試料を工事条件に合わせた方法で沈降堆積をさせ、 $t_0$ の沈降状態の含水比分布を測定す

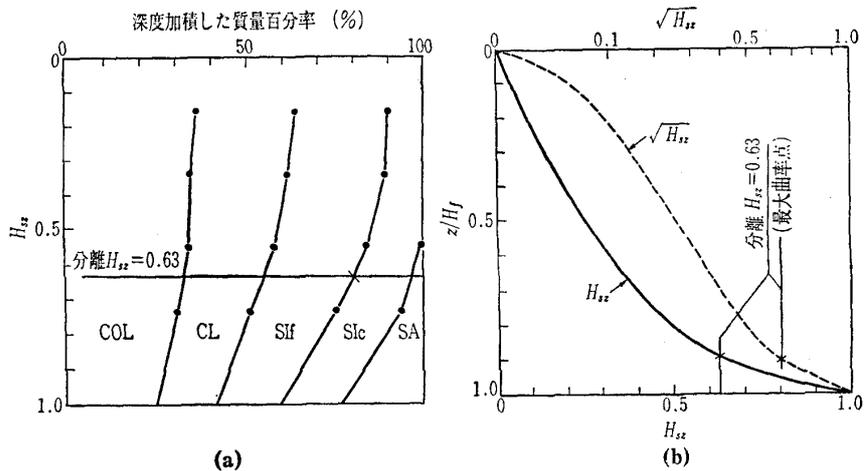


図-14 粒度の分離深度

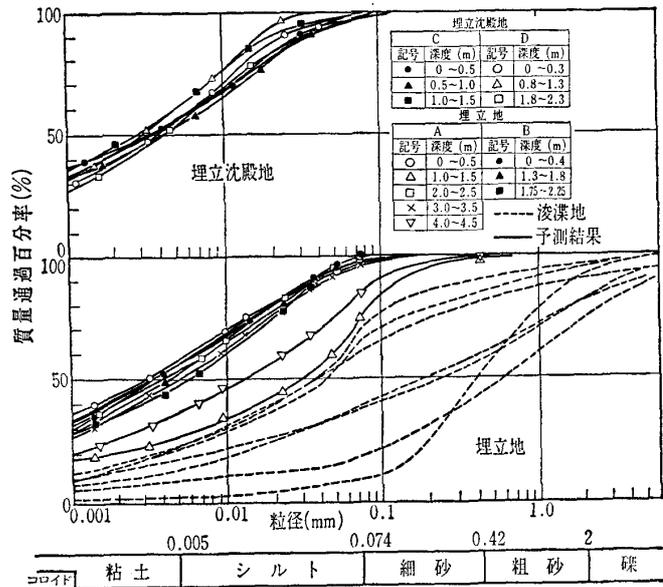


図-15 埋立細粒土および浚渫地盤の粒度組成

ることにより予測することができた。なお、実工事との対応で難しい点は、投入含水比が一定でないこと、汚濁防止のために添加される凝集剤の量は浚渫土の変化と汚濁水の状況に応じて変更されること等がある。

参考文献

- 1) 山内・上浜・石橋・矢野：博多湾浚渫泥土の土質諸特性，土と基礎，Vol. 31, No. 6, pp. 39~44, 1983.
- 2) 今井・鶴谷・矢野：A Treatment of Salinity in Water Content Determination of Very Soft Clays, 土質工学論文報告集，第19巻，第3号，pp. 84~89, 1979.
- 3) 矢野・鶴谷：スラリー状細粒土の沈降堆積について，第17回土質工学研究発表会，pp. 185~188, 1982.
- 4) Been, K. and Sills, G.C.: Self-weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study, Geotechnique 31, No. 4, pp. 39~44, 1983.

(原稿受理 1983.8.13)