

港湾技術資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 568 Dec. 1986

浚渫土スラリーの沈降特性に及ぼす凝集剤の影響

安 立 重 昭
蔵 谷 満
竹 内 孝 之

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. スラリーの沈降メカニズムと既往の研究	4
2.1 沈降メカニズム	4
2.2 既往の研究	5
3. 実験の概要	7
3.1 供 試 土	7
3.2 実験方法	7
4. 実験結果及び検討	8
4.1 沈降・堆積過程における界面沈降速度	8
4.2 沈降・堆積過程における堆積土の形成	11
4.3 圧密沈降過程における圧密沈降係数	16
4.4 堆積土の最終高さと体積変化率	19
5. ま と め	23
6. あ と が き	24
参 考 文 献	24
記号一覧表	24

Effects of Coagulant to Settling Properties of Dredged Material Slurries

Shigeaki ADACHI*
Mitsuru KURATANI**
Takayuki TAKEUCHI**

Synopsis

When very soft soils are dredged and reclaimed by pump dredger, coagulants are often added to dredged material slurries in order to prevent water pollution by effluent. The settling properties of dredged material slurries which added coagulant differ from those added no coagulant. Authors carried out settling tests using actual clay and polymeric coagulant in order to clear up the effects of coagulant to the settling properties of dredged material slurries. The following main conclusions were obtained through this study.

- 1) In settling stage, the interface's settling velocity of the slurry is increased by adding coagulant. The coagulant adding ratio which gives maximum settling velocity is larger than that gives minimum residual turbidity.
- 2) The height of the deposit at the end of settling stage is decreased by adding coagulant.
- 3) The time settling stage requires is decreased by adding coagulant.
- 4) With the increase of initial water content, the coefficient of consolidation settling increases. The coefficient is decreased by adding coagulant.
- 5) The final height of the deposit is increased by adding coagulant.
- 6) The time self-weight consolidation requires is decreased by adding coagulant.

* Chief of Sludge Treatment Laboratory, Machinery Division
** Member of Sludge Treatment Laboratory, Machinery Division

浚渫土スラリーの沈降特性に及ぼす凝集剤の影響

安立重昭*
蔵谷満**
竹内孝之**

要 旨

ポンプ浚渫船によって軟弱な粘性土の浚渫・埋立てを行う際、余水による埋立地周辺水域の汚濁防止を図るため排砂管に凝集剤が注入されることがある。このように浚渫土スラリーに凝集剤を添加した場合、その沈降特性は無添加の場合とかなり異なったものとなる。したがって、凝集剤を用いる場合には沈降特性に及ぼす凝集剤の影響についても十分、検討しておく必要がある。本研究ではこの問題について現地粘土と高分子凝集剤を用いた実験を行い、以下に要約する点を明らかにした。

- (1) 沈降・堆積過程における界面沈降速度は凝集剤を添加すると増加するが、界面沈降速度が最大となる凝集剤添加率は残留濁度が最小となる凝集剤添加率よりも大きい。
- (2) 沈降・堆積過程終了時の堆積土高さは実質土量高さが同じ場合、初期含水比が高いほど高くなる。凝集剤を添加した場合には、無添加時よりも低くなる。
- (3) 凝集剤を添加した場合、沈降・堆積過程終了までの経過時間は、無添加時より短くなる。
- (4) 圧密沈降係数は初期高さにかかわらず一定であり、初期含水比の増加に伴い増加する。凝集剤を添加した場合には、無添加時よりも小さくなる。
- (5) 自重圧密終了時の堆積土高さを堆積土の最終高さとしたとき、堆積土の最終高さは実質土量高さが同じ場合、初期含水比に依存しない。凝集剤を添加した場合には、無添加時よりも高くなる。
- (6) 凝集剤を添加した場合、自重圧密終了までの経過時間は、無添加時より短くなる。
- (7) 埋立てに伴う体積変化率は埋立層厚が大きくなるほど小さくなる。凝集剤を添加した場合には、無添加時よりも大きくなる。

1. まえがき

埋立工事は古くから行われてきた代表的港湾工事の一つであり、この工事の目的は用地造成のほか航路・泊地等の浚渫に伴い発生する浚渫土の処分である。埋立地に投入される浚渫土が良質な砂質土等であればあまり大きな問題はないが、従来は埋立用材として敬遠されていた軟弱な粘性土のような場合が近年は多く、このためさまざまな問題が発生している。

ポンプ浚渫船で海底に堆積した軟弱な粘性土を浚渫・埋立てする場合、浚渫土中の粗粒土は排砂管吐出口付近

に堆積するが、粘土、シルト等の細粒土はスラリー状で流動し、埋立地の広い範囲に堆積する¹⁾。この細粒土は埋立用材としては望ましくないものであるが、海洋環境保全についての要請の高まりにより埋立地外へ流出させることが許されなくなってきた。しかし、細粒土は粗粒土に比べて沈降性が悪く、埋立地の条件等によっては余水吐からの流出を極力、抑制し、余水による埋立地周辺水域の汚濁防止を図るための対策が必要となる。

この対策の一つとして排砂管に凝集剤を注入することにより浚渫土スラリーの沈降性を改善することが行われる。一方、広大な埋立地を確保することは近年、非常に

* 機材部 汚泥処理研究室長

** 機材部 汚泥処理研究室

困難になってきている。この結果、浚渫土量に見合った必要最小限度の埋立地面積の決定といった問題が生じてきた。このような問題の解決に当たっては、浚渫土スラリーの沈降特性に関する知見がその基礎となる。しかし、浚渫土スラリーに凝集剤を添加した場合、添加濃度によっては沈降特性が無添加の場合とかなり異なったものとなり、したがって凝集剤を用いる場合には沈降特性に及ぼす凝集剤の影響についても十分、検討しておく必要があるが、この点についての系統的な研究はほとんど見当たらない。

本研究ではこのような観点から浚渫土スラリーの沈降特性に及ぼす凝集剤の影響を検討することにした。もっとも凝集剤を添加しない浚渫土スラリーそのものの沈降特性についてもまだ不明な点が多い。このため、現地粘土を用いて凝集剤を添加しない場合の沈降特性をまず調べ、これと比較する形で浚渫土スラリーの沈降特性に及ぼす凝集剤の影響を明らかにした。

2. スラリーの沈降メカニズムと既往の研究

スラリーの沈降特性についてはさまざまな分野とりわけ化学工学の分野においてかなり古くから研究が進められてきている。一方、海成粘土より成る浚渫土スラリーは化学工学等の分野で研究の対象とされてきたスラリーに比べて高濃度であること及び凝集性が高いことがその特徴であるが、これを直接の対象とした研究はあまり多くない。しかし、凝集性スラリーに関する既往の研究には浚渫土スラリーに適用できるものも少なくなく、浚渫土スラリーの研究に当たっては、これら凝集性スラリーに関する既往の研究を十分に踏まえる必要がある。また、沈降特性の検討に当たっては、当然ながら沈降メカニズムに対する理解が不可欠である。このため、ここでは浚渫土スラリーの沈降特性に関する検討に先立ち、主として既往の研究に基づいた浚渫土スラリーを含めた凝集性スラリー一般の沈降メカニズム及び海成粘土スラリーの沈降特性に関する既往の研究について述べることにする。

2.1 沈降メカニズム

単一粒子の沈降は粒子の性状（密度、形状）及び媒体の性状（密度、粘性係数）のみによって支配される。このような単一粒子については Reynolds 数の範囲に応じてその終末沈降速度を与える理論式あるいは実験式が求められている。このような沈降速度式の代表的なものとしてよく用いられるのが Stokes の式である。しかし、スラリーが沈降する場合には、多数の粒子が同時に沈降するため粒子相互間の影響が無視できず、その特性は単一

粒子の沈降とはかなり異なったものとなる。このような沈降は一般に多粒子沈降と呼ばれている。

この多粒子沈降は図-1に示すようにスラリーの濃度及び凝集性によって四つの沈降様式に分類できることが知られている。スラリーの濃度が低く、凝集性も小さい場合には粒子間の相互作用がないためその特性は単一粒子の場合と変わらず、この場合は「単粒子自由沈降」と呼ばれている。一方、低濃度であっても凝集性がある程度大きい場合は、粒子相互の流線の干渉を無視することができても、個々の粒子の沈降速度に差があるために生ずる大きな粒子の小さな粒子への衝突の際に両粒子が合体して微細なフロックが形成される。このフロックがさらに衝突を繰り返す結果、大小種々のフロックが形成されるが、これらのフロック自体は自由に沈降する。この場合は「凝集性単粒子沈降」と呼ばれ、理論的な取扱いの最も困難な沈降様式である。凝集性単粒子沈降の場合よりも濃度が高くなるかあるいは凝集性が大きくなると形成されたフロックは相互に強い干渉を受け、個々のフロックは相対的な位置を変えることなく、全体が一体となって沈降する。この場合は「界面沈降」と呼ばれ、明瞭な界面が形成されるのが特徴である。さらに高濃度となると明瞭な界面が形成されるものの、フロックが沈降するというよりも直ちに自重圧密による圧縮変形が生じるようになる。この場合は「圧密沈降」と呼ばれている。

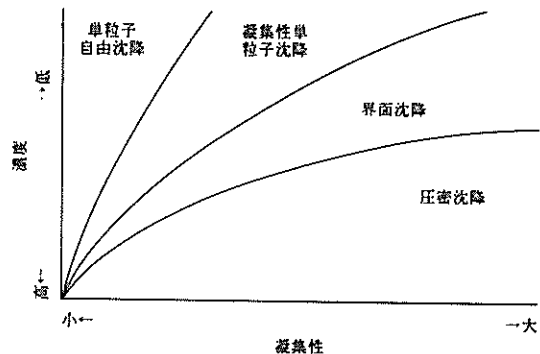


図-1 スラリーの沈降様式

浚渫土スラリーは海水を媒体とするため、前述したように凝集性の大きいことがその特徴である。この凝集性は海水中に含まれる塩分の働きによって生じるものである²⁾。Imai³⁾は東京湾、大阪湾及び仙台湾の海成粘土から作成したスラリーの初期含水比と塩分濃度を種々に変えたときの沈降様式を調べている。この結果によれば、含水比が600~1500程度である浚渫土スラリーの沈降様

式は大部分の範囲が界面沈降であり、含水比が低い場合には圧密沈降に属していることがわかる。このため、浚渫土スラリーの沈降特性を検討する際には、界面沈降をする範囲を主たる検討対象とすればよいと考えられる。

界面沈降あるいは圧密沈降をする凝集性スラリーの沈降特性は、沈降曲線を解析することによって検討することができる。沈降曲線は一般に、横軸に沈降開始後の経過時間、縦軸に界面高さをとったものであり、比較的簡単に測定できるにもかかわらず多くの情報を含むものである。したがって多くの研究者がこの沈降曲線に基づいてスラリーの沈降特性を検討している。スラリーが界面沈降をする場合、その沈降過程を図-2に示すように「フロック形成過程」、「沈降・堆積過程」、及び「圧密沈降過程」の3過程に分けることができる。フロック形成過程は凝集作用によりフロックが形成され、沈降を開始するために要する過程である。ただし、浚渫土スラリーのように凝集性が大きい場合にはきわめて短時間であり、事実上、無視できる場合が少なくない。沈降・堆積過程は形成されたフロックが一体となって沈降するとともに、沈降したフロックが逐次、集積されて堆積物が形成される過程である。フロックの沈降が終了すると圧密沈降過程に移る。この過程は堆積した粒子の重量により間隙水が絞り出されて堆積物が圧密により変形する過程である。ただし、この自重圧密は圧密沈降過程のみで生じるものでなく、沈降・堆積過程においても進行していることに留意する必要がある。また、間隙水が排水され、間隙水圧が消失してもその時点で変形は完全に終了するわけではなく、その後はクリープ領域に入り、非常に緩慢な変形が続く。

スラリーが圧密沈降をする場合には、界面沈降における沈降・堆積過程がなく、直ちに圧密沈降過程が始まるとみなすことができるが、圧密による変形が開始する前にクラック形成過程ともいふべき過程が観察される場合もある。

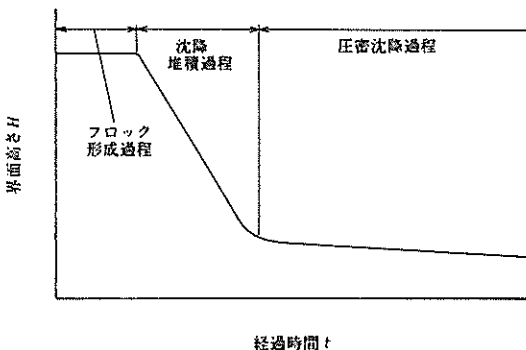


図-2 スラリーの沈降過程

2.2. 既往の研究

(1) 沈降特性の表示式

スラリーの沈降濃縮操作は化学工業における基本的操作であり、下水汚泥の重力濃縮もこれに類するものである。このため、濃縮槽の設計が重要な工学的問題となり、この設計をより合理的に進めるためスラリーの沈降特性に関する研究が進められてきた。これまで研究の対象とされてきたスラリーの沈降モードは界面沈降あるいは圧密沈降に属しているので、メスシリンダー等を用いて沈降試験を行い沈降曲線を比較的容易に求めることができる。この沈降曲線から実際の濃縮槽における沈降曲線を推定するためには、沈降特性を定式化することが必要であり、このために多くの努力が払われてきた。

界面の沈降速度は基本的な沈降特性であるが、この界面沈降速度はスラリーの濃度、凝集性等の要因によって複雑に変化し、理論式を求めることは難しい。このため、多くの研究者によって沈降特性に関するさまざまな表示式が提案されているが、その性格は実験式、半理論式、圧密理論を適用した理論式とまちまちであり、適用範囲も異なっている。

Kynch⁴⁾はスラリーのある層の沈降速度はその部分の局所濃度のみの関数であると仮定し、同一種類のスラリーについて初期濃度を変えて個々に沈降試験を行う必要はないとして、ある初期濃度における1本の沈降曲線からそれより高いすべての初期濃度における沈降速度を理論的に求める方法を示している。この方法は非常に便利なものであるが、砂のような圧縮性のない懸濁物のスラリーには適用できても、活性汚泥のような圧縮性の大きい懸濁物のスラリーにはそのまま適用できないとされており、浚渫土スラリーに対してもこの方法は適用できないと考えられる。

また、Work と Kohler は初期濃度が一定で初期高さが異なるスラリーの沈降曲線は相似関係にあり、初期高さ H_0 の異なる沈降曲線を H/H_0 と t/H_0 で整理すると1本の沈降曲線が得られることを見出した。この関係を用いれば、1回の沈降試験の結果から異なる初期高さの沈降曲線を推定することができるが、この方法は圧密沈降過程に入らない範囲に対して適用できるとされている。

これらの方法はいずれも1本の沈降曲線から初期濃度あるいは初期高さの異なる場合の沈降曲線を推定する便利な方法であるが、適用範囲に大きな限界がある。前にも述べたようにスラリーが界面沈降をする場合、その沈降過程はフロック形成過程、沈降・堆積過程及び圧密沈降過程の3過程に分かれ、沈降のメカニズムもそれぞれ

の過程で異なっている。このため、沈降特性を詳細に把握しようとするれば、それぞれの過程ごとに検討がなされなければならないと考えられる。

沈降・堆積過程においては、スラリーの界面は等速度で沈降することが知られている。さらにこの界面沈降速度は濃度のみの関数であり、次式で表すことができるとされている。

$$\left(\frac{v_s}{v_i}\right)^n = e_s \quad \dots\dots(1)$$

ここで v_s : 外部間隙比 = e_s のときの界面沈降速度

v_i : 粒子群を構成する単一粒子の終末沈降速度

指数 n は Richardson らの研究によれば、単粒子の終末沈降速度と単粒子の径に関する Reynolds 数によって定まる指数である。ただし、砂のように剛球とみなせる懸濁物のスラリーの場合にはその外部間隙比を容易に求めることができるが、フロックを形成している場合には直接、求めることは難しく、式(1)は浚渫土スラリーのような凝集性スラリーの界面沈降速度の表示式としては、必ずしも適当ではないと考えられる。矢野⁵⁾は東京湾の海成粘土から作成したスラリーについて実験を行い、沈降・堆積過程における界面沈降速度と初期含水比の間には、ある初期含水比の範囲において一次比例の関係があることを示している。

圧密沈降過程に対しては、多くの研究者によってさまざまなスラリーを対象とした研究がなされているが、矢野⁵⁾は東京湾の海成粘土スラリーを用いた実験から界面高さ H と経過時間 t の間には両対数目盛で表すと直線関係があり、次式で示されるような関係があることを示している。

$$\log H = \log h_i - C_s \log t \quad \dots\dots(2)$$

または

$$H = h_i \cdot t^{-C_s} \quad \dots\dots(3)$$

上式中の係数 C_s は直線の傾きを表し、圧密沈降の速度を与える係数であるのでこれを圧密沈降係数と呼んでいる。また、この圧密沈降係数 C_s は初期含水比が高いほど大きくなり、初期含水比が一定であれば、初期高さに関係なく一定であることを明らかにした。この関係は次式で示される酸化鉄等の微粒スラリーに対して提案された実験式である Rollason の式に類似している。

$$\frac{H}{H_\infty} = a t^b \quad \dots\dots(4)$$

ここで H_∞ : 最終界面高さ

a, b : 対象とするスラリーに関する定数

また、吉岡ら⁶⁾はレーキ作用を受けている炭酸カルシウム等のスラリーに対して、次式で示される Rollason の式に類似した表示式を提案している。

$$\frac{H}{C_0 H_0} = a' \left(\frac{t}{C_0 H_0}\right)^{b'} \quad \dots\dots(5)$$

ここで C_0 : 初期濃度

(2) 最終界面高さ

圧密沈降が終了した時点におけるスラリーの最終界面高さは、埋立地の容量等を決定するうえで重要な特性である。もっとも厳密に言えば、前節で述べたように自重圧密が終了してもその時点で圧密は完全に終了するわけではなく、その後はクリープ領域に入り非常に緩慢な変形が続く。

穂積⁷⁾はカオリン及び浄水場汚泥の薬品凝集スラリーについて、24～72時間経過後の界面高さを最終界面高さ H_∞ としたとき次式で示される関係があることを示している。

$$H_\infty = a'' (C_0 H_0)^{b''} \quad \dots\dots(6)$$

また、穂積ら⁸⁾は活性汚泥スラリーに対しても同様の関係があることを示している。一方、海成粘土スラリーに対して、山内ら⁹⁾及び矢野⁵⁾は自重圧密終了時の堆積土高さと実質土量高さ(4.2で説明する。)の間に式(6)と同様の関係があることを示している。

(3) 凝集剤の影響

浚渫土スラリーに添加される凝集剤は無機凝集剤と高分子凝集剤に大別され、無機凝集剤は主として清澄効果を、高分子凝集剤は沈降効果を得るために用いられるが、高濃度のスラリーに対しては高分子凝集剤が単独で用いられることも多い。このように浚渫土スラリーに凝集剤を添加すると、まえがきでも述べたように添加濃度によっては沈降速度等の沈降特性が変化するとともに、堆積土の性状が自然状態におけるものと異なることが考えられる。

柳瀬ら¹⁰⁾は3種類の現地粘土と1種類の無機凝集剤及び2種類の高分子凝集剤を用いてスラリーの沈降速度及び堆積土の密度、せん断強度、圧密特性等を調べ、凝集剤を添加した場合の自重圧密終了後における堆積密度は無添加の場合より小さいこと、凝集剤を添加しても堆積土の力学的性質はほとんど変化しないこと等を示している。山内ら⁹⁾は博多湾の海成粘土と無機凝集剤及び高分子凝集剤を用いて、凝集剤添加の有無による沈降曲線の

差異を調べている。この結果、自重圧密開始後の沈降曲線は同等とみなされ、凝集剤は濁り防止には有効であっても、埋地地盤の密度には影響を及ぼさないものと考えられるとしている。

3. 実験の概要

3.1 供試土

浚渫土スラリーとして本実験では、苫小牧港で浚渫された粘性土を海水で所定の初期含水比に希釈したものをを用いた。

供試土の自然含水比は実験に用いた全ロットについて57.7～77.8%であった。また、3検体について分析した結果を平均すると、土粒子の比重は2.71、液性限界は73.1%、塑性限界は34.1%、強熱減量は4.3%であった。図-3は粒径加積曲線を示したものであり、粒度組成の平均値は細砂分2%、シルト分44%、粘土分54%であった。

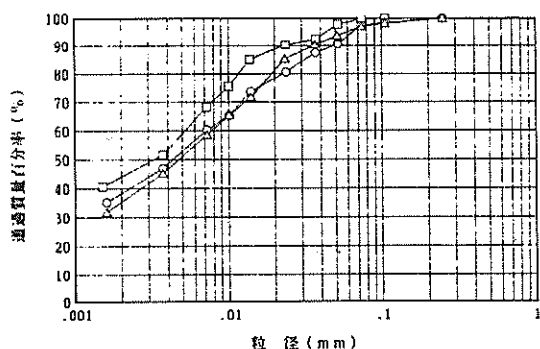


図-3 供試土の粒径加積曲線

3.2 実験方法

実験に先立ち、海水を用いて供試スラリーを作成した。海水としては久里浜湾の海水を用いた。この海水の塩分濃度も微細土粒子の凝集性に影響するが、ここでは一定として採水した海水をそのまま用いた。供試スラリーの作成に当たっては、スラリーの濃度を均一にするためミキサーを用いて十分に攪拌し、未分散の土塊がスラリー中に残らないよう配慮した。

実験に用いた沈降筒は外径120mm、内径110mmの透明アクリル製で、高さは1000mm及び300mmの2種類として初期高さに応じて使い分けた。この沈降筒に作成した供試スラリーを所定の初期高さまで満たしたうえで沈降筒内の濃度分布が均一になるように一定時間攪拌し、攪拌を終了した時点を経過時間の起点として所定の時間ごとに界面の高さを読み取った。攪拌時間は1分

間とし、凝集剤を添加する場合は添加前、後にそれぞれ30秒間攪拌した。界面高さの読み取りは30日間継続するのを標準とし、読み取ったデータはすべてパーソナルコンピュータに入力したうえで、沈降曲線の作成等の処理を行った。なお、これらの実験は沈降筒内の対流及び温度変化による粘性係数等の物性値の変化による影響を防止するため、すべて20℃に保った恒温室内で行った。

実験はまず凝集剤を添加しない基本的なケースとして初期含水比を480～2009%の間で5通り、初期高さを2.5～80cmの間で6通りに変化させて行った。初期高さを変えたのは、界面沈降速度に及ぼす初期高さの影響を調べるためと、堆積土高さ等に及ぼす自重圧密の影響が無視できないことからこれらに対する初期高さあるいは実質土量高さの影響を調べるためである。次に凝集剤を添加した場合の沈降特性を調べるため、初期含水比を991～1997%の間で4通り、初期高さを2.5～80cmの間で5ないし6通り、凝集剤添加濃度を2～40mg/lの間で初期含水比に応じて数通りに変化させて実験を行った。前に述べたように浚渫土の埋立工事に際して使われる凝集剤には無機凝集剤と高分子凝集剤があり、その凝集機構も異なっているが、ここでは高分子凝集剤を検討の対象とした。高分子凝集剤はさらにそのイオン性によってアニオン性、カチオン性、ノニオン性に分類できるが、実験にはポリアクリルアミド系中アニオン性高分子凝集剤を0.1%に溶解して使用した。このほか、界面沈降速度及び残留濁度に及ぼす凝集剤添加濃度の影響を調べるため、初期高さをほぼ20cmと一定にして、凝集剤添加濃度を0.5～100mg/lの間で8通りに変えた実験も行った。

実験ケースの概要は以上に述べたとおりであるが、このうち初期含水比については、供試土の自然含水比が一樣でないため、必ずしも作成時の計算どおりにはならない。このため、作成した供試スラリーの一部をサンプリングして初期含水比を求めた。なお、含水比が高い場合、海水中の塩分の影響により通常の方法で求めた含水比 w' と真の含水比 w の間には大きな誤差が生じる¹⁾このため、次式により塩分の影響を補正して真の含水比を求め、これを初期含水比とした。

$$w = \frac{1 + \beta}{1 - \beta w'} w' \quad \dots\dots(7)$$

ここで β : 海水に含まれている塩分重量の真水重量に対する比

なお、実験に用いた久里浜湾海水の β は採水時期により若干の変動はあるがほぼ0.021であった。

4. 実験結果及び検討

浚渫土スラリーの沈降様式は2.1で述べたように主として界面沈降に属している、この場合の沈降特性は沈降曲線を解析することにより把握できる。図-4.1及び4.2は供試スラリーの沈降曲線の一例である。これらの図は初期含水比を1025%とし、初期高さを3通りに変えた場合の沈降曲線を示したものであり、同一の実験結果を表している。ただし、経過時間を表示する横軸の目盛が異なり、図-4.1は算術目盛表示であるのに対して、図-4.2は対数目盛表示である。算術目盛表示は沈降・堆積過程における界面沈降速度等の沈降過程初期における沈降特性を表すのに適し、対数目盛表示は自重圧密による変形等の長期にわたる沈降特性を表すのに適している。図-4.1からは等速沈降をしている区間を見出すことができ、この場合の沈降様式が界面沈降に属していることがわかる。以下では主として界面沈降をする場合について、実験により得られた沈降曲線を解析して、浚渫土スラリーの沈降特性と初期含水比等の関係さらにこれと比較する形で凝集剤を添加した場合の沈降特性について順次、検討する。

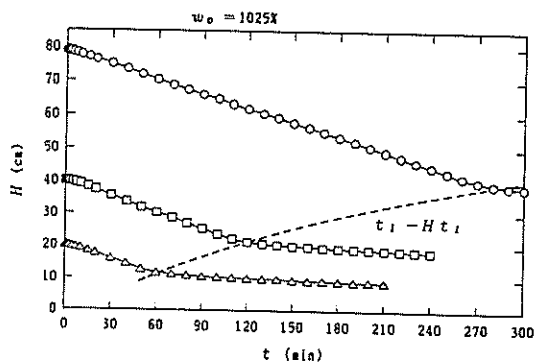


図-4.1 供試スラリーの沈降曲線 ($H-t$)

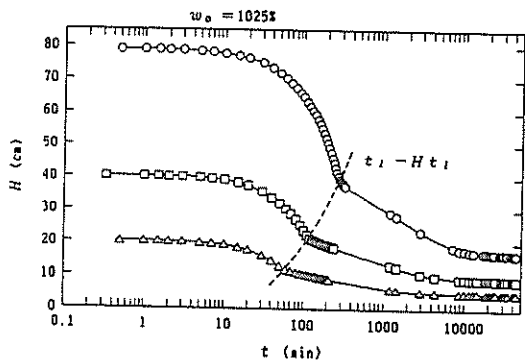


図-4.2 供試スラリーの沈降曲線 ($H-\log t$)

4.1 沈降・堆積過程における界面沈降速度

均一に攪拌されている供試スラリーの攪拌を停止すると、塩分の働きによって形成された微細なフロックは相互に干渉しながら沈降を開始し、その結果として明瞭な界面が形成される。この界面の沈降速度は埋立地に投入された浚渫土スラリーの泥面高さに関係する特性である。また、泥面高さが高くなれば余水吐付近の流れに巻き込まれる浮遊物質量が増加し、その結果として余水の水質が悪化することから、環境保全という面からみても重要な特性である。

スラリーが界面沈降する場合、2.2でも述べたようにその界面は濃度のみ依存した等速沈降をするといわれている。図-5は初期高さを一定とし、初期含水比 w_0 を変えた場合の沈降曲線を示したものである。図から初期含水比が810~2009%の場合には、等速沈降をする区間を見出すことができ、その沈降様式は界面沈降に属していることがわかる。一方、初期含水比が480%の場合にはほとんど沈降せず、この場合の沈降様式は圧密沈降に属していることがわかる。また、初期含水比が810%の場合には沈降過程初期に沈降速度のきわめて遅いフロック形成過程があり、その後等に等速沈降をしている区間がある。これは初期含水比が低く、したがってスラリーの濃度が高い場合、攪拌が終了してもまだ十分な大きさのフロックが形成されていない、界面沈降をするために必要なフロックの形成に時間を要するためである。

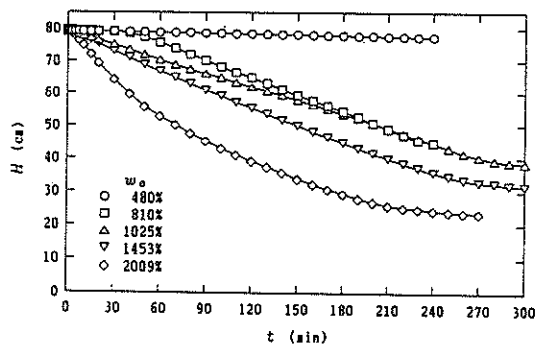


図-5 沈降曲線 ($H-t$) に及ぼす初期含水比の影響

以下では界面沈降をする場合の沈降・堆積過程における界面沈降速度について検討する。界面沈降速度は界面の高さを H としたとき、等速沈降をしている区間の沈降曲線の勾配 dH/dt として求めることができる。図-6.1~6.4はそれぞれ初期含水比 w_0 を4通りに変え、それぞれの場合について界面沈降速度 v_i と初期高さ H_0 の

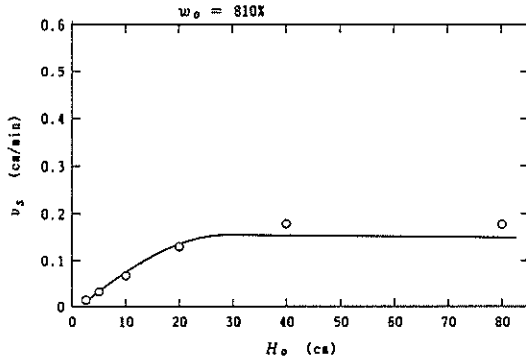


図-6.1 界面沈降速度と初期高さの関係
($w_0 = 810\%$)

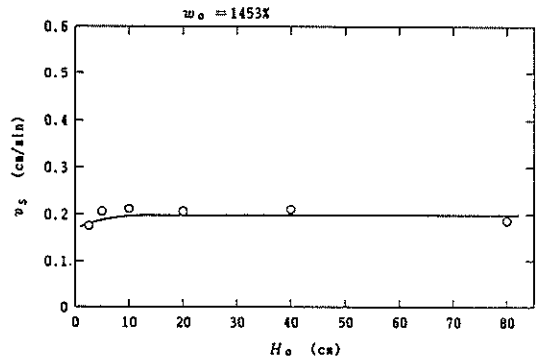


図-6.3 界面沈降速度と初期高さの関係
($w_0 = 1453\%$)

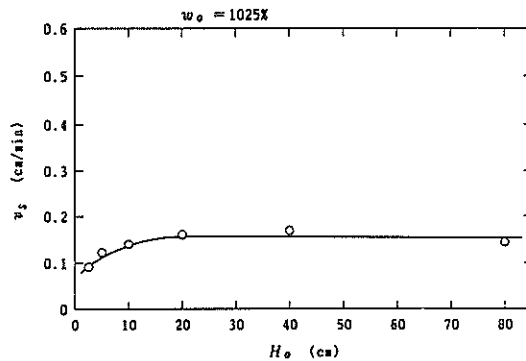


図-6.2 界面沈降速度と初期高さの関係
($w_0 = 1025\%$)

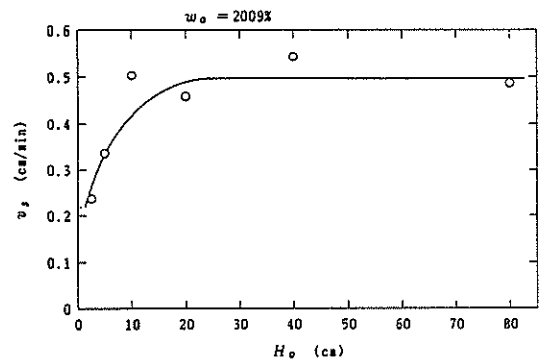


図-6.4 界面沈降速度と初期高さの関係
($w_0 = 2009\%$)

関係を示したものである。これらの図から界面沈降速度は初期高さにある程度依存し、初期高さが低い場合は初期高さの増加につれて界面沈降速度も増加するが、初期高さが高くなるとある一定の値に収れんすることがわかる。

図-7は界面沈降速度がほぼ一定値に収れんしたと判断できる初期高さ $H_0 = 20, 40, 80$ cm の場合における平均値と別途、実験を行った $H_0 = 70$ cm の場合の値を用いて界面沈降速度 v_s と初期含水比 w_0 の関係を示したものである。図から両対数目盛で表すと界面沈降速度と初期含水比の間には直線関係があることがわかる。したがって、界面沈降をする場合の界面沈降速度 v_s と初期含水比 w_0 の関係は次式で表すことができる。

$$\log v_s = \log h_s + k_s \log w_0 \quad \dots\dots(8)$$

または

$$v_s = h_s \cdot w_0^{k_s} \quad \dots\dots(9)$$

ここで h_s, k_s : スラリーの性状による係数
供試スラリーについての界面沈降速度 v_s と初期含水比 w_0 の関係は式(9)を用いると次式で示される。

$$v_s = 7.7 \times 10^{-5} \cdot w_0^{1.12} \text{ (cm/min)} \quad \dots\dots(10)$$

前に述べたように矢野⁵⁾は界面沈降速度と初期含水比の

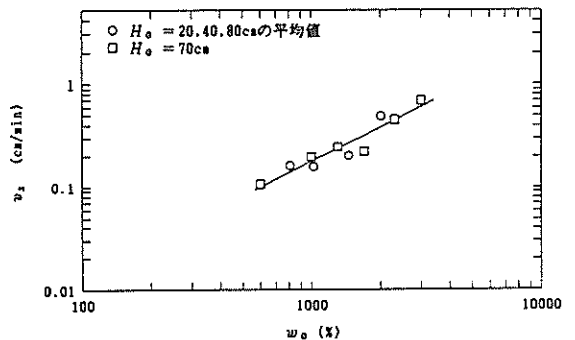


図-7 界面沈降速度と初期含水比の関係

間に一次比例の関係があることを示しているが、式(10)に示された関係は $k_s = 1.12$ であり、一次比例に近い関係とみなすこともできる。

次に凝集剤を添加した場合について検討する。ここで用いた凝集剤は前章で述べたようにポリアクリルアミド系中アニオン性高分子凝集剤である。浚渫土スラリーに高分子凝集剤を添加すると塩分の働きによって形成された微細なフロックは、水溶性高分子の架橋吸着作用によりさらに粗大なフロックとなり、その沈降特性は凝集剤を添加しない場合と異なってくる。図-8は初期含水比及び初期高さを一定として凝集剤添加濃度 C_p を0.5~100 mg/lの間で変化させたときの沈降曲線の一例を示したものであり、図から凝集剤添加濃度が高くなると界面沈降速度も大きくなることがわかる。図-9は沈降曲線の勾配 dH/dt から求められた界面沈降速度 v_s と凝集剤添加濃度 C_p の関係を初期含水比 w_0 を3通りに変えて示したものである。図から凝集剤添加濃度の増加につれて界面沈降速度が大きくなり、凝集剤添加濃度がある値をこえると巨大なフロックが形成されるため界面沈降速度が急激に増加することがわかる。しかし、さらに凝集剤添加濃度を増加させても界面沈降速度は増加せず、この値をこえるとむしろ低下し、界面沈降速度には最大値が存在することがわかった。一方、図-10は沈降開始60分後における水面から10cmの距離における残留濁度 T_{10} と凝集剤添加濃度 C_p の関係を示したものである。ここからはかなりはっきりと残留濁度が最小になるような凝集剤添加濃度の一定値の存在することがわかる。

残留濁度がある凝集剤添加濃度のときに最小となることは既に知られていることであるが、界面沈降速度についてもその値が最大となるような凝集剤添加濃度の一定値が存在することが明らかになった。高分子凝集剤を用いた場合、残留濁度がある凝集剤添加濃度のときに最小となる理由は次のように説明されている。模式的にいえば、水中において高分子凝集剤は何個かの土粒子と結合するための結合点を持った状態で存在しているが、この結合点は土粒子とは結合できても、結合点と結合点は互いに結合することができない。それゆえ、高分子凝集剤が過剰になると土粒子の表面が高分子凝集剤によって覆いつくされてしまい、他の土粒子と結合することができなくなるためフロックを形成せず、単一の土粒子として水中に取り残されてしまう。このように添加量を増加させて行くと最初のうちはすべての凝集剤の結合点が土粒子と結合して有効に働くが、添加量が多くなると有効に働かない結合点が増え、かえって残留濁度が増加する結果となる。界面沈降速度についてもほぼ同様の理由によ

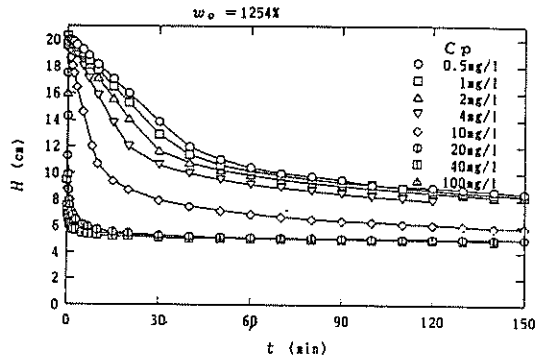


図-8 沈降曲線に及ぼす凝集剤添加濃度の影響

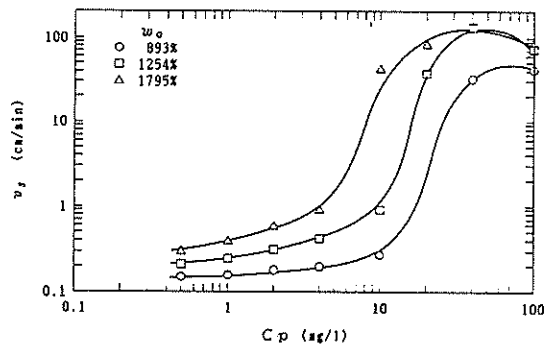


図-9 界面沈降速度と凝集剤添加濃度の関係

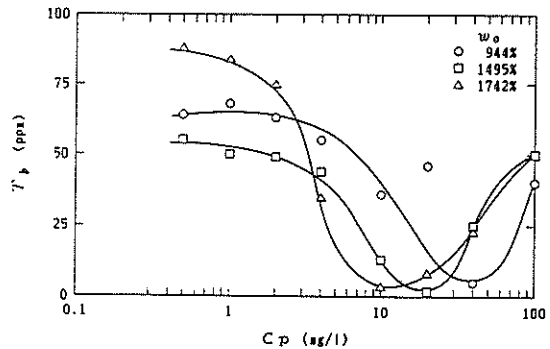


図-10 残留濁度と凝集剤添加濃度の関係

り高分子凝集剤が過剰になるとかえってフロックの結合力が弱くなるためその性状が悪化し、この結果として界面沈降速度が最大となるような凝集剤添加濃度の一定値が存在するものと考えられる。

以上の説明からも示唆されるように高分子凝集剤の働きは、水中における凝集剤の絶対量そのものよりもむしろ土粒子の表面積あるいは重量に対する凝集剤の割合に関係していると考えられる。そこで、このよう

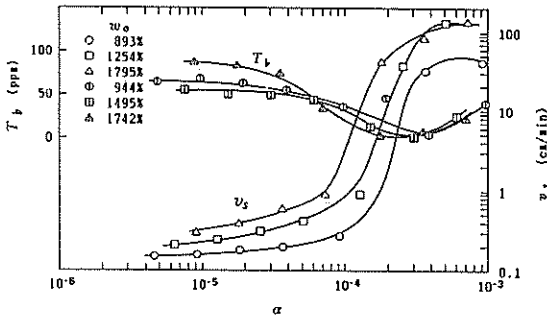


図-11 界面沈降速度，残留濁度と凝集剤添加率の関係

な割合を示すものとして，凝集剤重量/土粒子重量で定義される凝集剤添加率を導入する。図-11は界面沈降速度 v_s 及び残留濁度 T_b と凝集剤添加率 α の関係を示したものである。図から初期含水比 w_0 の違いにかかわらず界面沈降速度は凝集剤添加率がほぼ 6×10^{-4} のとき最大となり，残留濁度は凝集剤添加率がほぼ 3×10^{-4} のとき最小となることがわかる。すなわち沈降速度を最大にする凝集剤添加率 α_s と残留濁度を最小にする凝集剤添加率 α_t は一致せず， $\alpha_s > \alpha_t$ となることがわかる。したがって，沈降速度が最大となってもそのときの凝集剤添加率は残留濁度に対する関係では過剰となる結果，残留濁度は最小とはならない。逆に残留濁度が最小になっても界面沈降速度は最大とはならない。以上のことからわかるように浚渫スラリーに高分子凝集剤を添加する場合には，その目的とする効果（清澄効果か沈降効果か）に応じて添加濃度を決定しなければならない。

4.2 沈降・堆積過程における堆積土の形成

塩分の働きによって形成されたフロックあるいは凝集剤の働きによって形成されたさらに大きなフロックは，重力によって沈降し，これらのフロックが逐次，集積されて堆積土が形成される。この堆積土と沈降運動をしているフロック群の境界である堆積面は時間の経過に伴い上昇し，ついにはスラリーの界面と一致して沈降・堆積過程は終了する。この堆積土の性状は浚渫地山のそれとは異なっている。また，浚渫スラリーの初期含水比あるいは凝集剤を添加した場合にはその添加量によっても異なり，これらの諸要因と堆積土の形成過程及び性状との関係を知ることは，埋立地における浚渫土の堆積を理解するうえで不可欠である。

図-4.1のように横軸を算術目盛表示とした沈降曲線から沈降・堆積過程を表す直線と圧密沈降過程を表す直線（厳密に言えば直線ではないが，短い範囲では直線とみなして差し支えない）の交点が直ちに求められるとき

は，この交点を沈降・堆積過程の終了点とすることができる。しかし，図-12のように沈降・堆積過程と圧密沈降過程を表す沈降曲線が連続的に変化している場合には，この方法によることができない。そのため，ここでは沈降・堆積過程における沈降曲線に漸近する直線と圧密沈降過程におけるそれとの交点 C' における交角の2等分

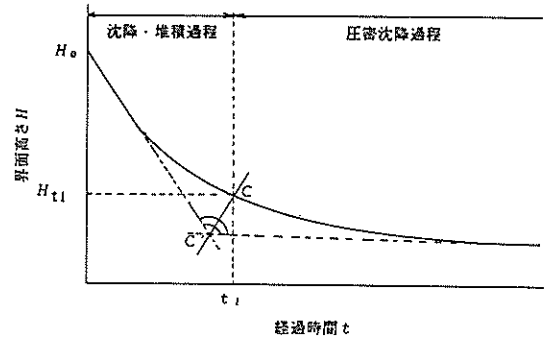


図-12 沈降・堆積過程の終了点

線と沈降曲線の交点 C を沈降・堆積過程の終了点とする図式解法¹²⁾を用いた。

(1) 沈降・堆積過程終了時の堆積土高さ

図-13は供試スラリーの初期含水比 w_0 をパラメータとして，上に述べた方法により求めた沈降・堆積過程終了時の堆積土高さ H_t と実質土量高さ H_s の関係を示したものである。ここで実質土量高さ H_s とはスラリー中に占める土粒子の体積を単位面積あたりの高さとして表したもので，次式により算出される。

$$H_s = \frac{H_0}{\frac{w_0 G_s}{100 G_w} + 1} \quad \dots\dots(11)$$

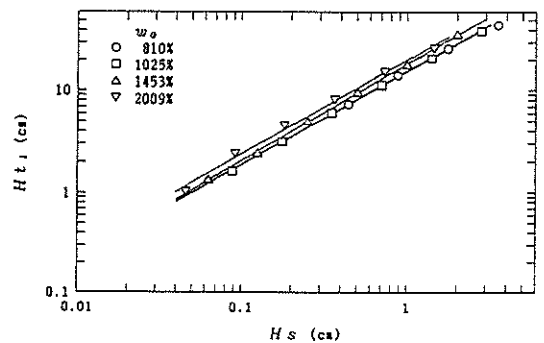


図-13 沈降・堆積過程終了時の堆積土高さとお実質土量高さの関係

ここで G_s : 土粒子の比重

G_w : 海水の比重

図から両対数目盛で表すと沈降・堆積過程終了時の堆積土高さと実質土量高さの間には直線関係があることがわかる。初期含水比の違いによる影響をみると、実質土量高さが同じでも初期含水比が高いほど沈降・堆積過程終

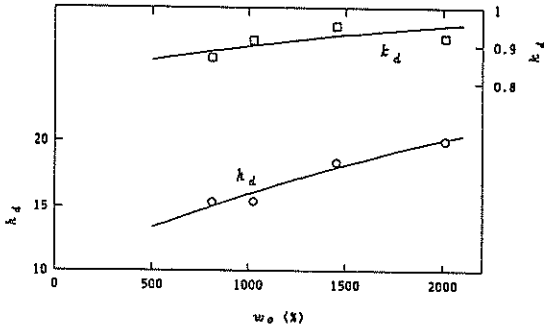


図-14 h_d , k_d と初期含水比の関係

了時の堆積土高さが高いこと、つまり平均含水比が高いことがわかる。

沈降・堆積過程終了時の堆積土高さ H_{t1} と実質土量高さ H_s の関係は次式で表すことができる。

$$\log H_{t1} = \log h_d + k_d \log H_s \quad \dots\dots\dots(12)$$

または

$$H_{t1} = h_d \cdot H_s^{k_d} \quad \dots\dots\dots(13)$$

ここで h_d , k_d : スラリーの性状による係数

図-14 は供試スラリーについて沈降・堆積過程終了時の堆積土高さ H_{t1} と実質土量高さ H_s の関係を式(12)あるいは式(13)を用いて表したときの h_d 及び k_d と初期含水比 w_0 の関係を示したものである。図から h_d 及び k_d は初期含水比が高くなるほど大きくなることがわかる。 k_d は両対数目盛で表したときの直線の勾配を表すが、砂の場合には堆積後の自重圧密による変形はほと

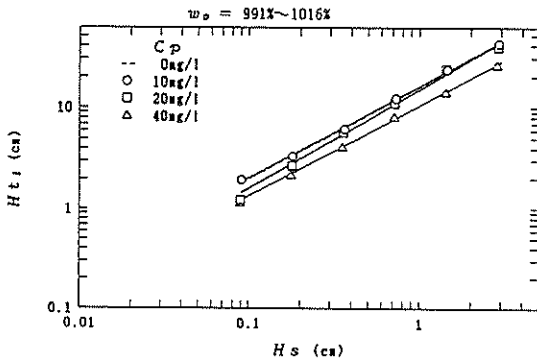


図-15.1 沈降・堆積過程終了時の堆積土高さに及ぼす凝集剤添加濃度の影響 ($w_0 = 991 \sim 1016\%$)

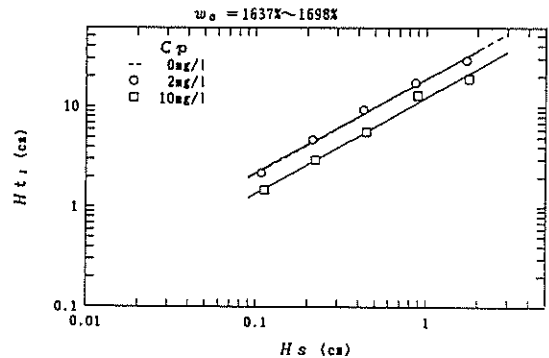


図-15.3 沈降・堆積過程終了時の堆積土高さに及ぼす凝集剤添加濃度の影響 ($w_0 = 1637 \sim 1698\%$)

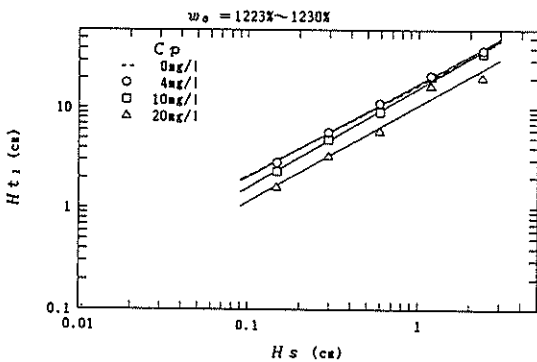


図-15.2 沈降・堆積過程終了時の堆積土高さに及ぼす凝集剤添加濃度の影響 ($w_0 = 1223 \sim 1230\%$)

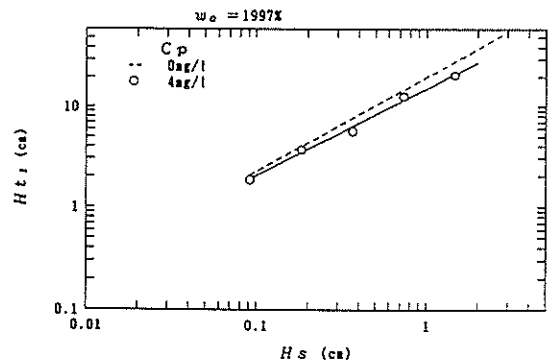


図-15.4 沈降・堆積過程終了時の堆積土高さに及ぼす凝集剤添加濃度の影響 ($w_0 = 1997\%$)

んど無視できるから沈降・堆積過程終了時の堆積土高さ
と実質土量高さは正比例して $k_d = 1$ となる。これに対し
て浚渫スラリーの場合には図-14からわかるように
 $k_d < 1$ となる。これは沈降・堆積過程においても進行
している自重圧密の影響により、実質土量高さの大きい
ほど堆積土の平均密度が大きい、すなわち単位実質土量
当たりの堆積土高さが低くなるためである。

次に供試スラリーに凝集剤を添加した場合について検
討する。図-15.1～15.4は初期含水比 w_0 を4通りに
変え、それぞれの場合について凝集剤添加濃度 C_p をパ
ラメータとして沈降・堆積過程終了時の堆積土高さ H_n
と実質土量高さ H_s の関係を示したものである。ただ
し、図中の破線は k_d 及び k_d と初期含水比 w_0 の関
係が図-14にしたがうものとして計算した凝集剤を
添加しない場合の関係を示したものである。これらの
図から凝集剤を添加した場合にも、両対数目盛で表し
たとき沈降・堆積過程終了時の堆積土高さ H_n と実質土量
高さ H_s の間には直線関係があり、初期含水比及び実質土
量高さが同じでも凝集剤添加濃度が大きいほど堆積土
高さが低いこと、つまり平均含水比あるいは平均間隙
比が小さいことがわかる。ただし、凝集剤添加濃度の
影響は凝集剤添加濃度を 10mg/l としたとき、初期含
水比が $991\sim 1016\%$ と低いときには無添加の場合とほと
んど異なるのに対して、初期含水比が $1637\sim 1698\%$
と比較的高い場合には無添加の場合と大きく異なってい
ることからわかるように、初期含水比によっても左右さ
れる。

図-16.1は凝集剤を添加した場合における沈降・堆
積過程終了時の堆積土高さ H_n と実質土量高さ H_s の関
係を、式(12)あるいは(13)を用いて表したときの h_d
と凝集剤添加率 α の関係を示したものである。図-16.2
は同じく k_d と α の関係を示したものである。これらの
図から h_d は凝集剤添加率が大きくなると減少すると

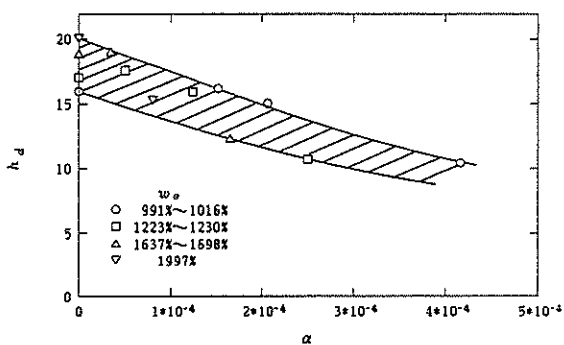


図-16.1 h_d と凝集剤添加率の関係

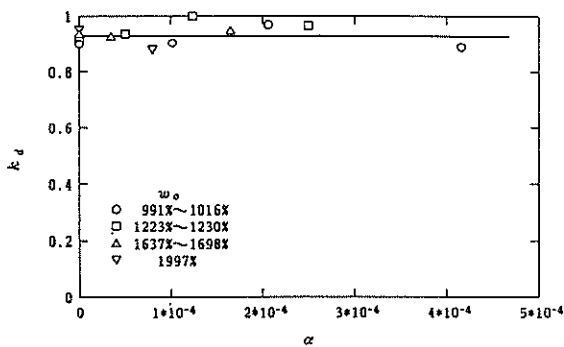


図-16.2 k_d と凝集剤添加率の関係

もに初期含水比の影響が弱くなる反面、 k_d はほとんど
変化しないことがわかる。したがって、凝集剤を添加し
た場合の沈降・堆積過程終了時の堆積土高さ H_n と実質土量
高さ H_s の関係は、凝集剤添加率が大きい場合には主として
凝集剤添加率に依存しているとみなすことができる。

(2) 堆積直後の堆積土の間隙比

沈降・堆積過程終了時の堆積土の含水比は供試土の自然
含水比よりはるかに高く、いわゆるふくれた状態にあ
る。この含水比の変化として把握できる浚渫・埋立てに
ともなう浚渫土の体積変化は堆積土を形成するフロック
の密度ないし内部間隙比に依存していると考えられる。
前に述べたようにこのフロックが逐次、集積されて堆積
土が形成されるが、堆積直後から自重圧密は進行するた
め、スラリーの初期含水比 w_0 が同じでも実質土量高さ
 H_s が異なれば沈降・堆積過程終了時における堆積土の
平均含水比 \bar{w}_n も異なってくる。この状況を示したもの
が図-17.1である。スラリーの体積変化は平均含水比の
変化として把握できるが、必ずしも直截な理解が得にく
いので、より直接的な表現である平均間隙比を用い、縦
軸を対数目盛として図-17.1と同じ内容を表したもの

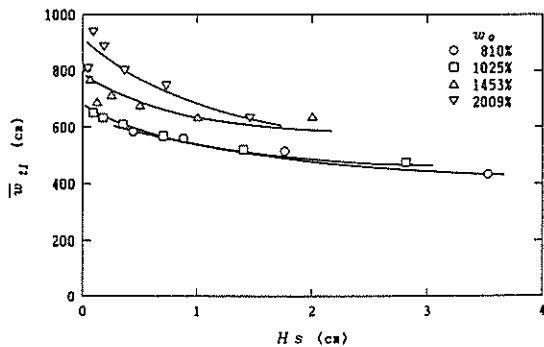


図-17.1 沈降・堆積過程終了時における堆積土の
平均含水比と実質土量高さの関係

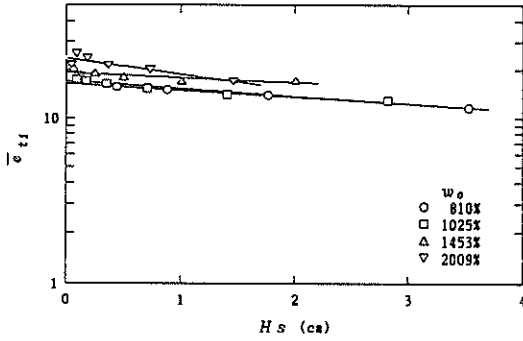


図-17.2 沈降・堆積過程終了時における堆積土の平均間隙比と実質土量高さの関係

が図-17.2である。ここで沈降・堆積過程終了時における堆積土の平均間隙比 \bar{e}_{t1} は次式により算出される堆積土中において間隙の占める体積の土粒子体積に対する比である。

$$\bar{e}_{t1} = \frac{H_{t1}}{H_s} - 1 \quad \dots\dots(14)$$

この平均間隙比と平均含水比 \bar{w}_{t1} との間には次式で示される関係がある。

$$\bar{e}_{t1} = \frac{\bar{w}_{t1} G_s}{100 G_w} \quad \dots\dots(15)$$

図-17.2 から縦軸を対数目盛としたとき、平均間隙比と実質土量高さの間には直線関係があるとみることができる。したがって、この直線関係を延長すれば実質土量高さ $H_s = 0$ としたときの平均間隙比を求めることができる。実質土量高さが0のときには自重圧密による体積変化はないと考えてよいから、このときの平均間隙比を自重圧密の影響をまだ受けていないフロックの集積に

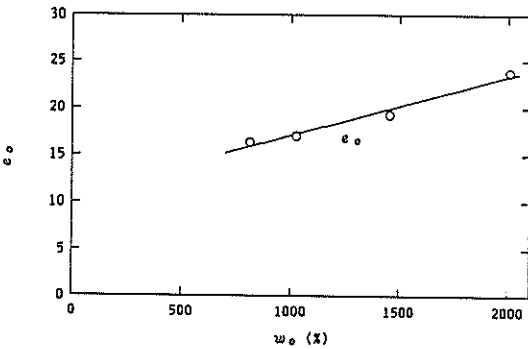


図-18 堆積直後の堆積土の間隙比と初期含水比の関係

より形成された堆積直後の堆積土の間隙比とみなすことができる。この堆積直後の間隙比 e_0 と初期含水比 w_0 の関係を示したものが図-18である。図から堆積直後の

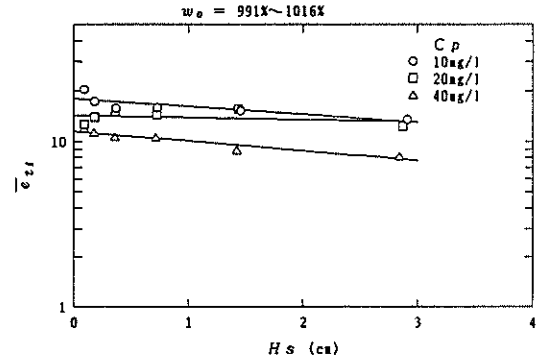


図-19.1 凝集剤を添加した場合の沈降・堆積過程終了時における堆積土の平均間隙比と実質土量高さの関係 ($w_0 = 991 \sim 1016\%$)

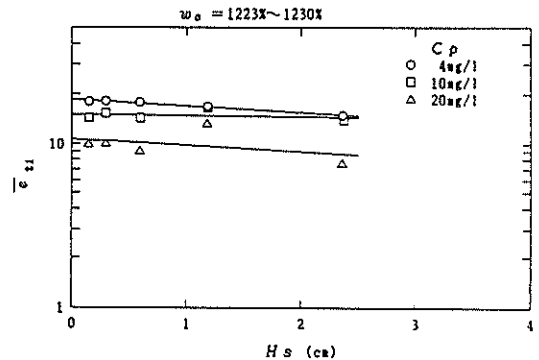


図-19.2 凝集剤を添加した場合の沈降・堆積過程終了時における堆積土の平均間隙比と実質土量高さの関係 ($w_0 = 1223 \sim 1230\%$)

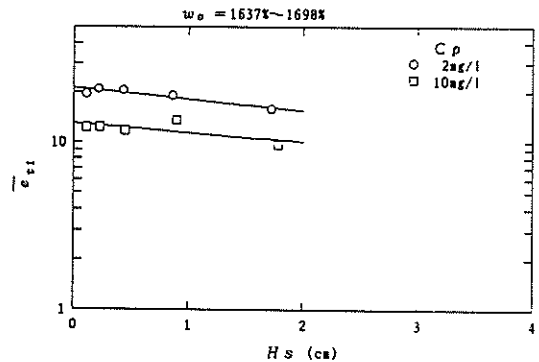


図-19.3 凝集剤を添加した場合の沈降・堆積過程終了時における堆積土の平均間隙比と実質土量高さの関係 ($w_0 = 1637 \sim 1698\%$)

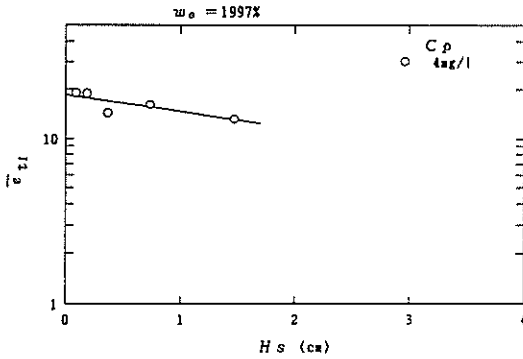


図-19.4 凝集剤を添加した場合の沈降・堆積過程終了時における堆積土の平均間隙比と実質土量高さの関係 ($w_0 = 1997\%$)

堆積土の間隙比とスラリーの初期含水比の間にはほぼ一次関数とみなせる関係があり、初期含水比が高いほど堆積直後の堆積土の間隙比が大きくなる。

次に供試スラリーに凝集剤を添加した場合における堆積直後の堆積土の間隙比について検討する。図-19.1～19.4はこの場合の沈降・堆積過程終了時の堆積土の平均間隙比 \bar{e}_s と実質土量高さ H_s の関係を示したものである。これらの図から凝集剤を添加した場合にも平均間隙比と実質土量高さの間に直線関係があるとみることができる。したがって、無添加時と同様の方法により堆積直後の堆積土の間隙比を求めることができる。図-20はこの方法により求めた堆積直後の堆積土の間隙比 e_0 と凝集剤添加率 α の関係を示したものである。図から堆積直後の堆積土の間隙比は凝集剤添加率の増加とともに減少するが、凝集剤添加率の増加に伴いその減少割合は緩やかになること、さらに凝集剤添加率が大きい場合には初期含水比の影響が弱くなり、主として凝集剤添加率に依存しているとみなして差し支えないことがわかる。

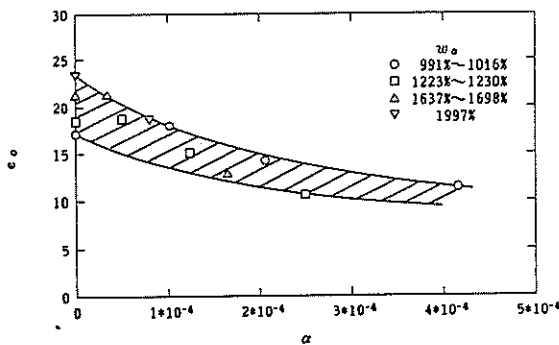


図-20 堆積直後の堆積土の間隙比と凝集剤添加率の関係

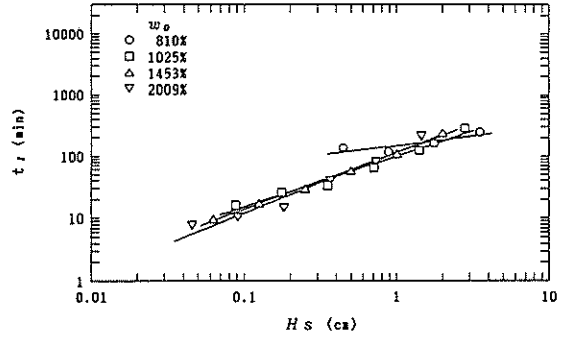


図-21 沈降・堆積過程終了までの経過時間と実質土量高さの関係

(3) 沈降・堆積過程終了までの経過時間

(1)では沈降・堆積過程終了時の堆積土高さについて検討したが、この沈降・堆積過程終了までの経過時間も前に述べた図式解法により求めることができる。

図-21は供試スラリーの初期含水比 w_0 をパラメータとして、沈降・堆積過程終了までの経過時間 t_1 と実質土量高さ H_s の関係を示したものである。図から両対数目盛で表すと沈降・堆積過程終了までの経過時間と実質土量高さの間にも直線関係があり、沈降・堆積過程終了までの経過時間 t_1 と実質土量高さ H_s の関係は次式で表されることがわかる。

$$\log t_1 = \log h_d' + k_d' \log H_s \quad \dots\dots (16)$$

または

$$t_1 = h_d' H_s^{k_d'} \quad \dots\dots (17)$$

ここで h_d' , k_d' : スラリーの性状による係数
初期含水比の違いによる影響をみると、初期含水比が1025～2009%と比較的に高い場合には初期含水比の違いによる影響はあまり顕著ではない。これに対して初期含水比が810%の場合にはこれらの場合とかなり異なっている。この理由は前にも述べたようにこの場合には沈降過程初期に沈降速度のきわめて遅いフロク形成過程があり、しかも後掲する図-23.1からわかるようにこのフロク形成過程に要する時間は初期高さすなわち実質土量高さあまり依存しない結果、実質土量高さの変化による沈降・堆積過程終了までの経過時間の変化も初期含水比が比較的に高い場合に比べて小さくなるためであると考えられる。

次に供試スラリーに凝集剤を添加した場合を、初期含水比が991～1025%の場合を例にして検討する。図-22はこの場合について凝集剤添加濃度 C_p をパラメータと

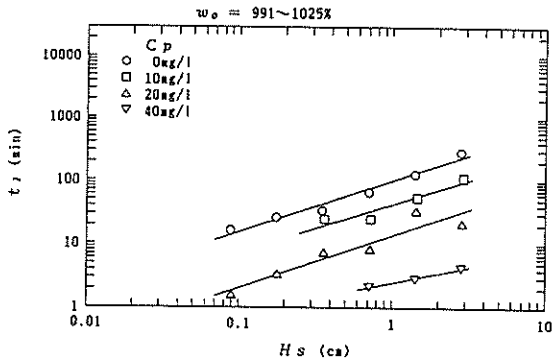


図-22 沈降・堆積過程終了までの経過時間に及ぼす凝集剤添加濃度の影響 ($w_0 = 991 \sim 1025\%$)

して、沈降・堆積過程終了までの経過時間 t_f と実質土量高さ H_s の関係を示したものである。図から凝集剤を添加したときにも沈降・堆積過程終了までの経過時間と実質土量高さの間には直線関係があり、凝集剤添加濃度が大きいほど沈降・堆積過程終了までの経過時間が短い

ことがわかる。また直線の勾配したがって kd は凝集剤添加濃度が $0 \sim 20 \text{ mg/l}$ の場合にはほぼ等しく 0.8 である。これに対して凝集剤添加濃度が 40 mg/l と高い場合にはほぼ 0.5 となる。図-22 と図-15.1 を比較すると、凝集剤添加濃度が 10 mg/l の場合には沈降・堆積過程終了時の堆積土高さは無添加時とほとんど異なるのに対して沈降・堆積過程終了までの経過時間は無添加時の $1/2$ 以下となり、このことからわかるように沈降・堆積過程終了までの経過時間に対する凝集剤の影響は堆積土高さに対するそれより顕著である。

4.3 圧密沈降過程における圧密沈降係数

圧密沈降過程はフロックが集積することにより形成された堆積土が自重圧密により変形する過程である。したがって、この過程における界面の沈降速度は沈降・堆積過程に比べてはるかに小さい。この過程の沈降特性を把握することは堆積土高さの時間的変化を知るうえで重要である。

図-23.1 ~ 23.4 は供試スラリーの初期含水比 w_0 を $810 \sim 2009\%$ の間で4通りに変え、同一初期含水比に対

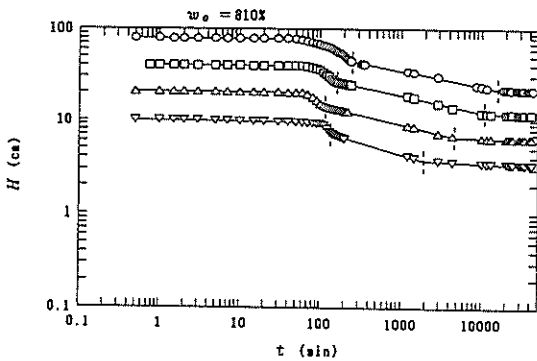


図-23.1 供試スラリーの沈降曲線 ($\log H - \log t, w_0 = 810\%$)

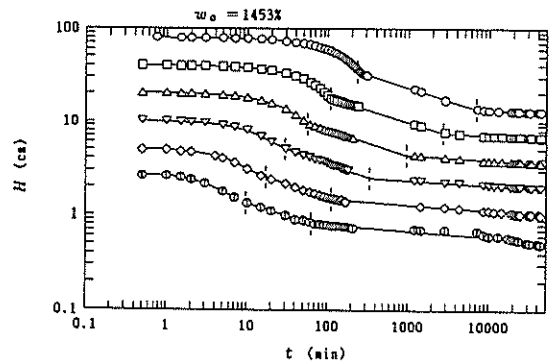


図-23.3 供試スラリーの沈降曲線 ($\log H - \log t, w_0 = 1453\%$)

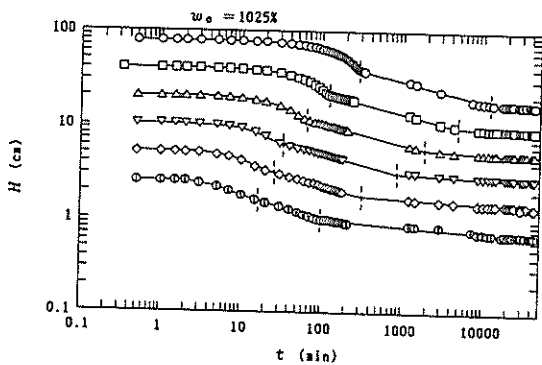


図-23.2 供試スラリーの沈降曲線 ($\log H - \log t, w_0 = 1025\%$)

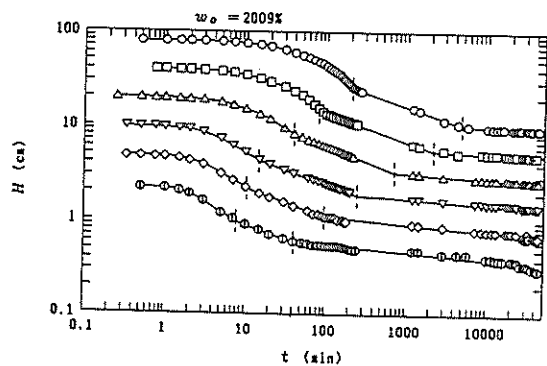


図-23.4 供試スラリーの沈降曲線 ($\log H - \log t, w_0 = 2009\%$)

して初期高さを数通りに変えた場合の沈降曲線を示したものである。ただし、図-4.1あるいは図-4.2と異なり両対数目盛で表されている。なお、図中の短い縦の破線は左側が前節で述べた図式解法による沈降・堆積過程の終了点を、右側が圧密沈降過程のうち自重圧密による変形を表す直線とクリープ領域を表す直線の交点を自重圧密の終了点としたときのその点を示したものである。このように圧密沈降過程は自重圧密による変形が進行している領域とクリープ領域に2分できるが、ここでは前者に限定して検討を進めて行く（以下、「圧密沈降過程」という表現はこの領域のみを表す）。これらの図から両対数目盛で表したとき圧密沈降過程に対応する区間の沈降曲線は直線となり、式(2)あるいは式(3)で表されるような関係があることがわかる。さらに初期含水比が同一の場合、これらの直線の傾き、したがって2.2で述べた沈降圧密係数 C_s は初期高さにかかわらず一定であることがわかる。図-24 は圧密沈降係数 C_s と初期含水比 w_0 の関係を示したものである。この図から圧密沈降係数 C_s は初期含水比の増加とともに増加するが、その増加割合はしだいに緩やかになることがわかる。

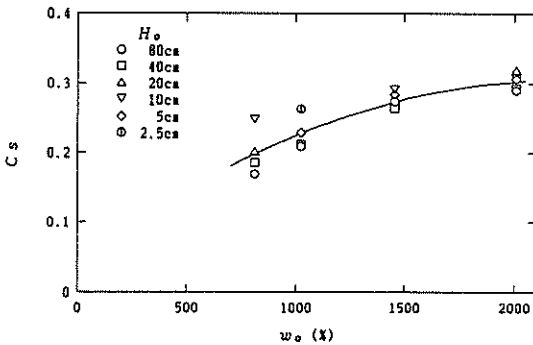


図-24 圧密沈降係数と初期含水比の関係

次に供試スラリーに凝集剤を添加した場合について検討する。図-25.1～25.3は凝集剤を添加した場合の一例として初期含水比 w_0 を991～1016%とし、凝集剤添加濃度を10, 20, 40 mg/lとしたときの沈降曲線を図-23.1～23.4と同様に両対数目盛で表したものである。これらの図から凝集剤を添加した場合にも圧密沈降過程に対応する区間の沈降曲線は直線となり、この場合についても式(2)あるいは式(3)で表されるような関係があることがわかる。直線の傾き、したがって圧密沈降係数 C_s についても、凝集剤を添加しない場合に比べてややばらつきは大きいものの、ほぼ初期高さにかかわらず一定とみなせることがわかる。図-26は凝集剤添加濃度

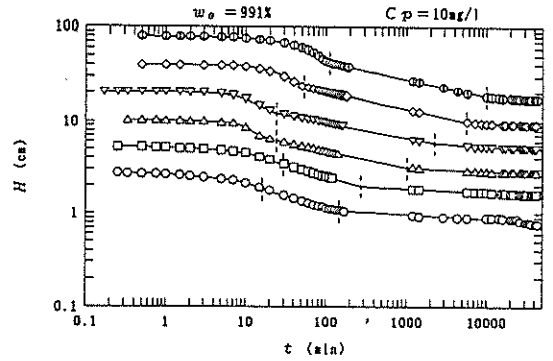


図-25.1 凝集剤を添加した場合の供試スラリーの沈降曲線
($\log H - \log t$, $w_0 = 991\%$, $C_p = 10\text{mg/l}$)

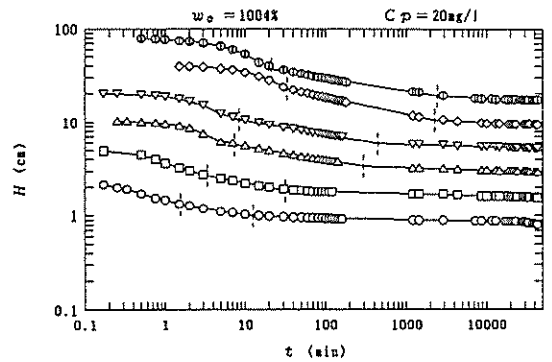


図-25.2 凝集剤を添加した場合の供試スラリーの沈降曲線
($\log H - \log t$, $w_0 = 1004\%$, $C_p = 20\text{mg/l}$)

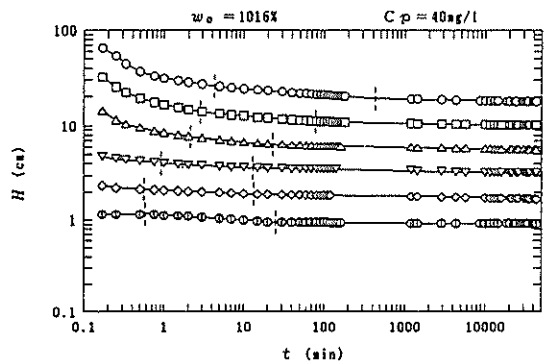


図-25.3 凝集剤を添加した場合の供試スラリーの沈降曲線
($\log H - \log t$, $w_0 = 1016\%$, $C_p = 40\text{mg/l}$)

C_p の沈降曲線へ及ぼす影響をみるため、図-25.1～25.3に示した沈降曲線のうち初期高さ $H_0 = 80\text{cm}$ のものと、これと初期含水比がほぼ同じで ($w_0 = 1025\%$)

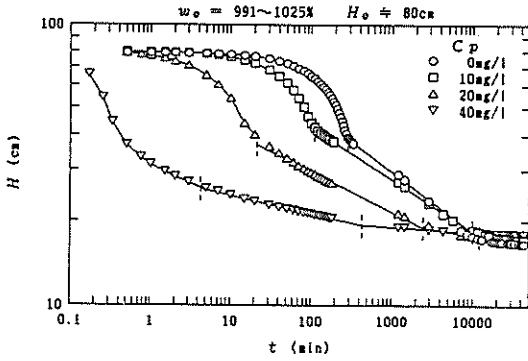


図-26 沈降曲線 ($\log H - \log t$) に及ぼす凝集剤添加濃度の影響

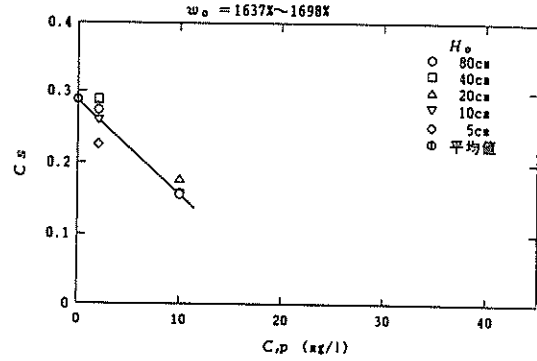


図-27.3 圧密沈降係数と凝集剤添加濃度の関係 ($w_0 = 1637 \sim 1698\%$)

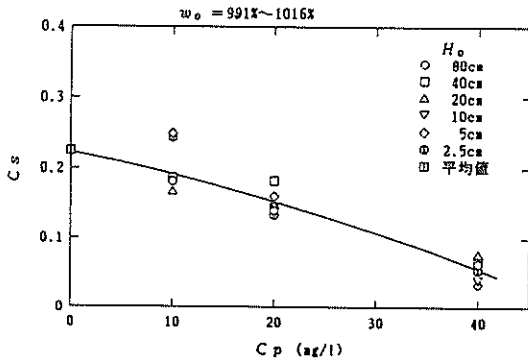


図-27.1 圧密沈降係数と凝集剤添加濃度の関係 ($w_0 = 991 \sim 1016\%$)

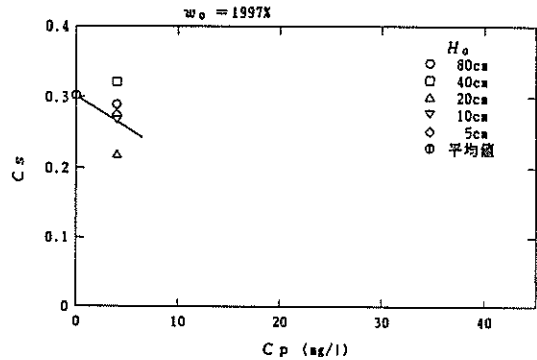


図-27.4 圧密沈降係数と凝集剤添加濃度の関係 ($w_0 = 1997\%$)

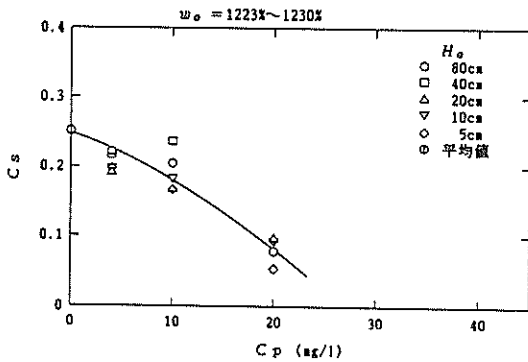


図-27.2 圧密沈降係数と凝集剤添加濃度の関係 ($w_0 = 1223 \sim 1230\%$)

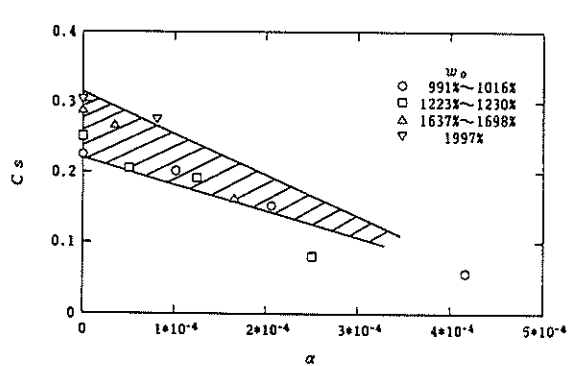


図-28 圧密沈降係数と凝集剤添加率の関係

凝集剤を添加しない場合の沈降曲線を同時にプロットしたものである。この図から凝集剤添加濃度が増加すると沈降・堆積過程の終了点は左下方に移動し、圧密沈降過程を表す直線の傾き、したがって圧密沈降係数 C_s は小さくなるのがわかる。

図-27.1~27.4は初期含水比 w_0 を4通りに変えて、圧密沈降係数 C_s と凝集剤添加濃度 C_p の関係 ($C_p = 0$ mg/l のときの値は図-24から求めたもの) を示したものである。これらの図から凝集剤添加濃度の増加により圧密沈降係数 C_s は減少するが、その減少割合は初期含水比によって異なり、初期含水比の高いほど大きいこ

とがわかる。さらに凝集剤添加濃度が同じでも初期含水比が異なれば圧密沈降係数 C_c は凝集剤添加濃度のみによっては決まらないことがわかる。図-28は圧密沈降係数 C_c と凝集剤添加率 α との関係を示したものである。ただし、この場合の圧密沈降係数 C_c は初期高さの異なる場合についての平均値である。この図から圧密沈降係数は凝集剤添加率が増加すると減少すること、さらに凝集剤添加率が大きい場合には初期含水比の影響が弱くなり主として凝集剤添加率に依存しているとみなして差し支えないことがわかる。

4.4 堆積土の最終高さと体積変化率

(1) 堆積土の最終高さ

堆積土の最終的な高さは浚渫土量に見合った埋立地面積の決定等に際して必要となる重要な特性である。ここではこの堆積土の最終高さとして自重圧密終了時の堆積土高さを検討の対象とし、以下ではこれを単に「堆積土の最終高さ」と呼ぶことにする。ただし、実際には自重圧密が終了しても、クリープによる変形が続き、長期に及ぶ沈下を対象とする場合には検討を必要とするものであるが、ここでは検討の対象としない。自重圧密終了時の堆積土高さ、したがってここでの堆積土の最終高さは前節に述べた方法により求めることができる。

図-29は初期含水比 w_0 をパラメータとして、堆積土の最終高さ H_{t2} と実質土量高さ H_s の関係を示したものである。図から両対数目盛で表すと堆積土の最終高さと

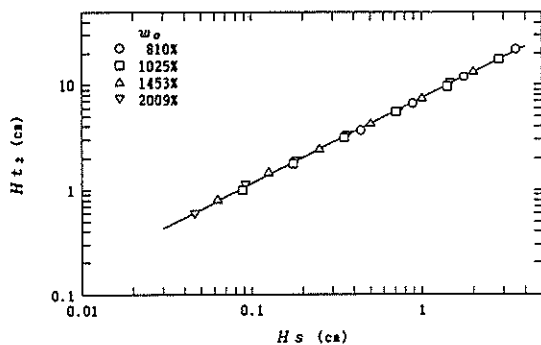


図-29 堆積土の最終高さと実質土量高さの関係

実質土量高さの間には直線関係があることがわかる。さらに図-13に示した沈降・堆積過程終了時の堆積土高さと実質土量高さの関係と異なり、実験の範囲では初期含水比に無関係であり、初期含水比 $w_0 = 810 \sim 2009\%$ の範囲を1本の直線で表すことができる。供試スラリーについてこの関係は次式で表される。

$$H_{t2} = 7.5 H_s^{0.82} \quad \dots\dots\dots(18)$$

この直線の傾きを示す係数である0.82は図-12に示されている k_d の値よりも小さい。

次に供試スラリーに凝集剤を添加した場合について検

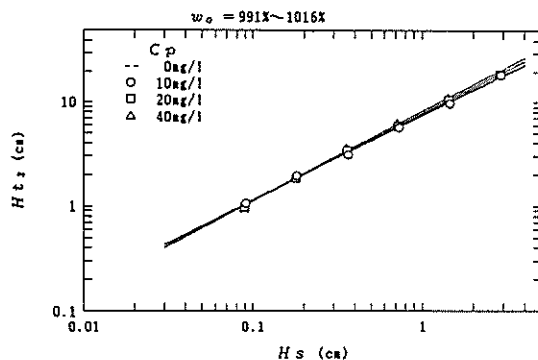


図-30.1 堆積土の最終高さに及ぼす凝集剤添加濃度の影響 ($w_0 = 991 \sim 1016\%$)

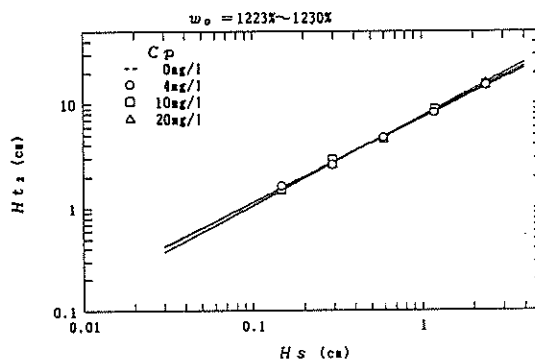


図-30.2 堆積土の最終高さに及ぼす凝集剤添加濃度の影響 ($w_0 = 1223 \sim 1230\%$)

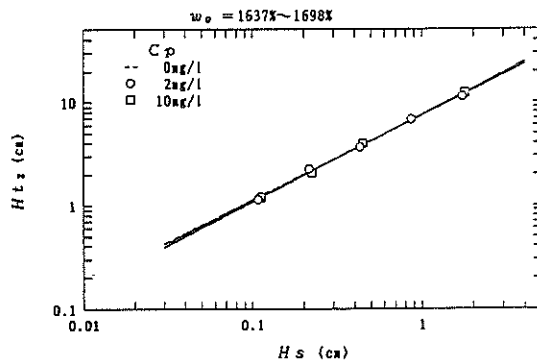


図-30.3 堆積土の最終高さに及ぼす凝集剤添加濃度の影響 ($w_0 = 1637 \sim 1698\%$)

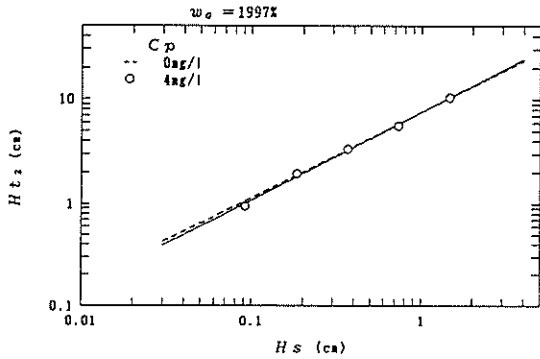


図-30.4 堆積土の最終高さに及ぼす凝集剤添加濃度の影響 ($w_0 = 1997\%$)

討する。図-30.1~30.4は初期含水比を4通りに変え、それぞれの場合について凝集剤添加濃度 C_p をパラメータとして、堆積土の最終高さ H_{t2} と実質土量高さ H_s の関係を示したものである。ただし、図中の破線は式(19)を用いて計算した凝集剤を添加しない場合の関係を示したものである。これらの図から凝集剤を添加した場合にも、両対数目盛で表したとき堆積土の最終高さを実質土量高さの間には直線関係があることがわかる、また、実質土量高さが同じ場合、凝集剤添加濃度が大きいほど堆積土の最終高さが高いこと、つまり堆積土のふくらみが大きいことがわかる。この点を仔細に検討するため堆積土の最終高さ H_{t2} と実質土量高さ H_s の関係を次式で表し、

$$H_{t2} = h_c H_s^{k_c} \quad \dots\dots(19)$$

このときの係数 h_c 及び k_c と凝集剤添加率 α の関係を示したものが図-31である。この図から係数 h_c 及び k_c と凝集剤添加率の間には一次関数とみなせる関係があり、凝集剤添加率が増加すれば h_c 、 k_c のいずれもが大きくなる結果、堆積土の最終高さが高くなることがわかる。

以上により堆積土の最終高さを実質土量高さの関係に

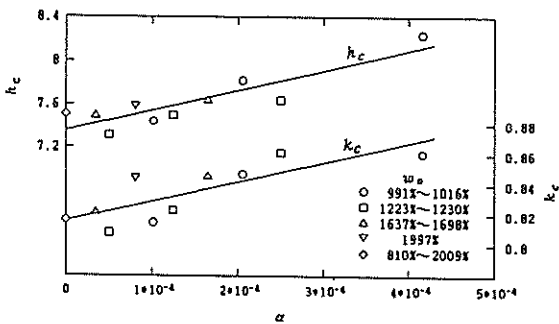


図-31 h_c 、 k_c と凝集剤添加率の関係

関する定量的検討についての手掛りが得られたので、次式で定義される凝集剤添加時の堆積土最終高さの無添加時に対する比 S_α を導入する。

$$S_\alpha = \frac{(H_{t2})_\alpha}{(H_{t2})_0} \quad \dots\dots(20)$$

ここで $(H_{t2})_\alpha$: 凝集剤添加率 = α のときの H_{t2}
 $(H_{t2})_0$: 凝集剤無添加時の H_{t2}

図-32は実質土量高さ H_s をパラメータとし、図-31に示した h_c 及び k_c と凝集剤添加率の関係を用いてこの凝集剤添加時の堆積土最終高さの無添加時に対する比 S_α と凝集剤添加率 α の関係を示したものである。図からこの比は凝集剤添加率にほぼ正比例して増加すること及び凝集剤添加率が同じでも実質土量高さによって異なり、実質土量高さが高いほど大きいことがわかる。

(2) 自重圧密終了までの経過時間

4.2では沈降・堆積過程終了までの経過時間について検討したが、ここでは自重圧密終了までの経過時間についてやや詳しく検討する。

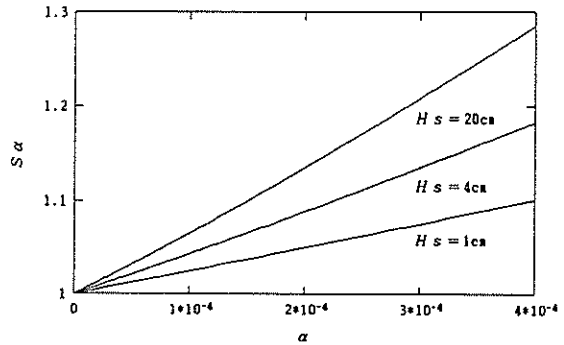


図-32 凝集剤添加時の堆積土最終高さの無添加時に対する比と凝集剤添加率の関係

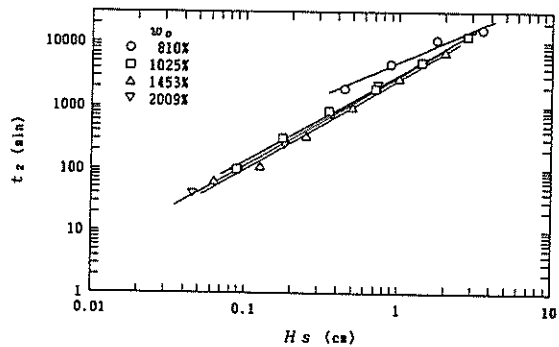


図-33 自重圧密終了までの経過時間と実質土量高さの関係

この自重圧密終了までの経過時間も前節に述べた方法により求めることができる。図-33は供試スラリーの初期含水比 w_0 をパラメータとして、自重圧密終了までの経過時間 t_2 と実質土量高さ H_s の関係を示したものである。図から両対数目盛で表すと自重圧密終了までの経過時間と実質土量高さの間には沈降・堆積過程終了までの経過時間と実質土量高さの関係と同様な直線関係があり、式(16)あるいは(17)と類似の関係式で表されることがわかる。さらに初期含水比の違いによる影響についても図-21に示した沈降・堆積過程終了までの経過時間についての関係とほぼ同様であり、堆積土高さ H_s と実質土量高さ H_p の関係が図-29に示したように初期含水比が810%の場合も含めて単一の関係で表されるのと異なっている。直線の勾配は初期含水比が1025~2009の場合がほぼ1.4なのに対して初期含水比が810%の場合にはほぼ1.0である。図-34は図-33とは逆に初期高さ H_0 をパラメータにして、自重圧密終了までの経過時間 t_2 と初期含水比 w_0 の関係を示したものである。この図から初期高さが同じ場

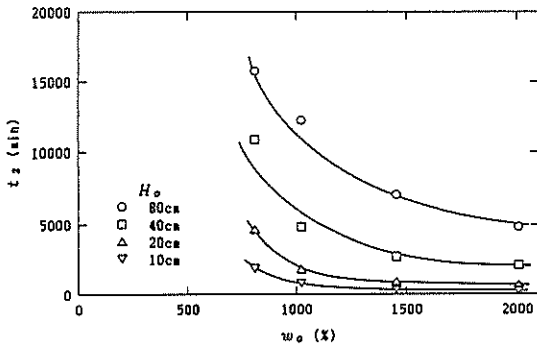


図-34 自重圧密終了までの経過時間と初期含水比の関係

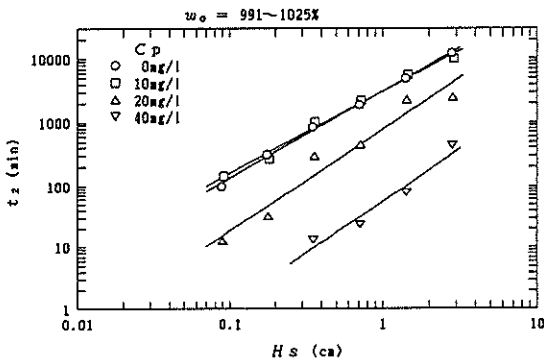


図-35 自重圧密終了までの経過時間に及ぼす凝集剤添加濃度の影響 ($w_0 = 991 \sim 1025\%$)

合、自重圧密終了までの経過時間は初期含水比の増加とともに短くなるが、その減少割合はしだいに緩やかになることがわかる。

次に供試スラリーに凝集剤を添加した場合について検討する。図-35は一例として初期含水比 w_0 が991~

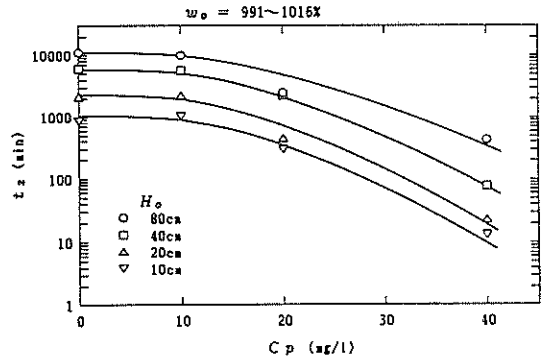


図-36.1 自重圧密終了までの経過時間と凝集剤添加濃度の関係 ($w_0 = 991 \sim 1016\%$)

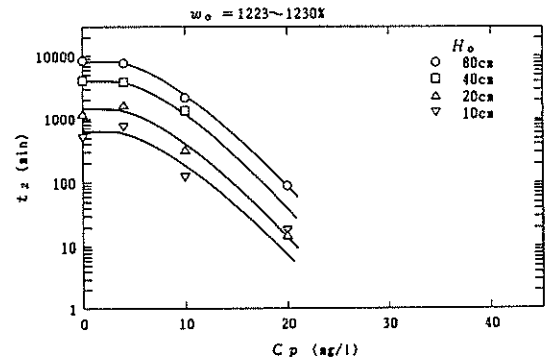


図-36.2 自重圧密終了までの経過時間と凝集剤添加濃度の関係 ($w_0 = 1223 \sim 1230\%$)

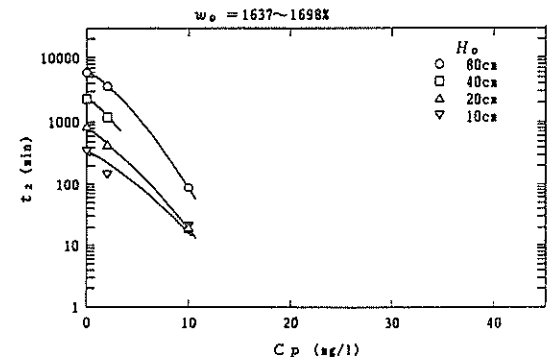


図-36.3 自重圧密終了までの経過時間と凝集剤添加濃度の関係 ($w_0 = 1637 \sim 1698\%$)

1025%の場合について凝集剤添加濃度 C_p をパラメータとして、自重圧密終了までの経過時間 t_2 と実質土量高さ H_s の関係を示したものである。図から凝集剤を添加したときにも自重圧密終了までの経過時間と実質土量高さの間には直線関係があり、凝集剤添加濃度が大きいほど自重圧密終了までの経過時間が短いことがわかる。ただし、凝集剤添加濃度が 10 mg/l の場合には図-22 に示した沈降・堆積過程終了までの経過時間についての関係と異なり、無添加時とほとんど異ならない。

図-36.1~36.3 は初期含水比 w_0 を3通りに変え、初期高さ H_0 をパラメータにして、自重圧密終了までの経過時間 t_2 と凝集剤添加濃度 C_p の関係を示したものである。これらの図から凝集剤添加濃度の増加により自重圧密終了までの経過時間は短くなるが、その減少割合は初期含水比によって異なり、初期含水比の高いほど大きいことがわかる。

(1)では堆積土の最終高さに及ぼす凝集剤添加率の影響を検討するため凝集剤添加時の堆積土最終高さの無添加時に対する比 S_a を導入したが、ここでは同様の観点から次式で定義される凝集剤添加時の自重圧密終了時間の無添加時に対する比 T_a を導入する。

$$T_a = \frac{(t_2)_\alpha}{(t_2)_0} \quad \dots\dots\dots(21)$$

ここで $(t_2)_\alpha$: 凝集剤添加率 α のときの t_2
 $(t_2)_0$: 凝集剤無添加時の t_2

図-37 は初期含水比 w_0 をパラメータとして、凝集剤添加時の自重圧密終了時間の無添加時に対する比 T_a と凝集剤添加率 α の関係を示したものである。図から初期含水比が同じ場合、これらの関係は初期高さに無関係であることがわかる。また、凝集剤添加率が同じでもこの比は初期含水比に依存し、初期含水比が高いほど小さくなり、したがって自重圧密終了までの経過時間が短くな

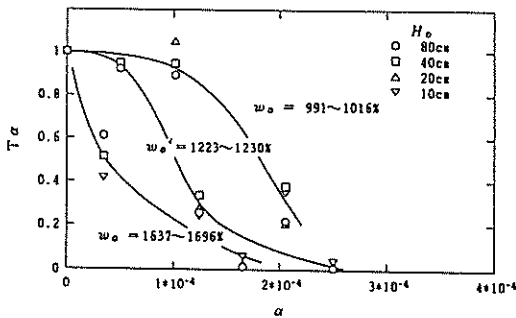


図-37 凝集剤添加時の自重圧密終了時間の無添加時に対する比と凝集剤添加率の関係

ることがわかる。

(3)堆積土の体積変化率

以上に述べたように浚渫土スラリーに凝集剤を添加すると無添加の場合に比べて堆積土の最終高さが高くなること及び自重圧密終了時間が短くなることが明らかになったが、特に前者は実際上も重要な問題である。なぜならば、このことは一般に、埋立層厚が制約されている埋立地の単位面積あたりの収容量に直接、関係し、浚渫土量に見合った埋立地面積の決定に影響してくるからである。

浚渫土量 V_i がポンプ浚渫船によってすべて埋立地に流送され、最終的(自重圧密終了後)に V_c になったときの体積変化率 ζ は次式で定義される。

$$\zeta = \frac{V_c}{V_i} = \frac{A H_{t2}}{V_i} \quad \dots\dots\dots(22)$$

ここで A : 埋立地の面積

浚渫土量が与えられたとき、埋立地の水深及び護岸の天端高さによって決まる埋立層厚=堆積土の最終高さを制約条件として埋立地面積を決定するという問題が一般であろうが、逆に埋立地面積を制約条件とする場合、さらに埋立地の層厚及び面積から必要な浚渫土量を求めるといった問題もあり得る。いずれにしても体積変化率が浚渫・埋立てにともなう埋立土のふくらみを表す重要な指標である。この体積変化率はこれまで述べてきたところからわかるように埋立層厚及び凝集剤添加率によって異なる。

浚渫土量 V_i に含まれる土粒子の体積 V_s は次式により求めることができる。

$$V_s = \frac{V_i}{\frac{w_i G_s}{100 G_w} + 1} \quad \dots\dots\dots(23)$$

ここで w_i : 浚渫土の自然含水比

埋立層厚 H_c = 堆積土の最終高さ H_{t2} から式(19)を変形した次式を用いてそのときの実質土量高さ H_s を求めることができる。

$$H_s = \left(\frac{H_c}{h_c} \right)^{\frac{1}{k_c}} \quad \dots\dots\dots(24)$$

ただし、上式中の係数 h_c 及び k_c は凝集剤を添加した場合には、図-31 に示されるように凝集剤添加率 α の関数である。浚渫土をすべて収容するために必要な埋立地面積 A は実質土量高さの定義から V_s/H_s として求めることができるから結局、埋立地面積 A と浚渫土量 V_i 、浚渫土の自然含水比 w_i 及び埋立層厚 H_c の関係は、式

図3及び図4を用いて次式のように表される。

$$A = \frac{V_i}{\frac{w_i G_s}{100 G_w} + 1} \left(\frac{H_c}{h_c} \right)^{-\frac{1}{k_c}} \quad \dots\dots (25)$$

埋立ての対象とする浚渫土の浚渫土スラリーについて式(22)中の係数 k_c 及び k_e がわかれば上式を用いて埋立地面積の決定等の検討を行うことができる。ここでは一つの事例として浚渫土の自然含水比 $w_i = 70\%$ 、浚渫土スラリーの初期含水比 $w_0 = 1000\%$ と想定し、図-31に示した供試スラリーについての k_c 及び k_e と凝集剤添加率の関係を用いて、式(22)及び(25)から体積変化率 ζ を計算してみる。図-38は凝集剤添加濃度 C_p をパラメータとし、このようにして計算した体積変化率 ζ と埋立層厚 H_c の関係を示したものである。(ただし、実験から得られた関係を実験範囲外へ外挿したことについて問題がないわけではないが、山内ら⁹⁾は凝集剤を添加しない場合について $H_0 = 148.5\text{cm}$ まで式(19)に示す関係が成り立つことを示している。) この図から埋立層厚が大きくなるほど体積変化率は小さくなるのがわかる。凝集剤を添加しない場合には、 $H_c = 1\text{m}$ のとき $\zeta = 1.42$ のに対して $H_c = 5\text{m}$ のときには計算上は $\zeta = 0.99$ と1以下になる。体積変化率に及ぼす凝集剤添加濃度の影響についてみると、埋立層厚が同じでも凝集剤添加濃度が高いほど体積変化率は大きいことがわかる。例えば、 $H_c = 1\text{m}$ の場合、 $C_p = 2\text{mg/l}$ のときには $\zeta = 1.45$ と無添加時とほとんど変わらないが $C_p = 10, 20\text{mg/l}$ のときには $\zeta = 1.54, 1.67$ となる。また、 $H_c = 5\text{m}$ の場合には $C_p = 2\text{mg/l}$ のときにはやはり $\zeta = 1.01$ と無添加時とほとんど変わらないが、 $C_p = 10, 20\text{mg/l}$ のときには $\zeta =$

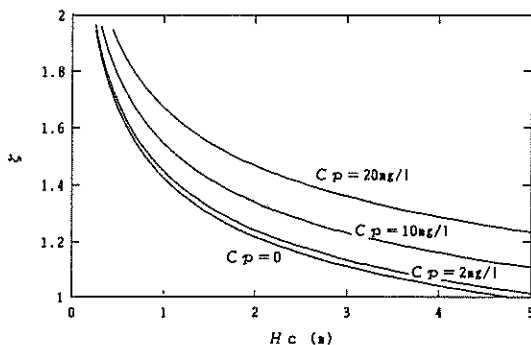


図-38 体積変化率と埋立層厚の関係
($w_i = 70\%$ 、 $w_0 = 1000\%$)

1.11, 1.24 となる。以上の検討は供試スラリーを対象としてなされたものであるが、浚渫土の種類が異なっても上に述べた検討結果はその傾向において妥当するものと考えられる。したがって、浚渫土スラリーに高分子凝集剤を添加する場合、特にその添加濃度が高い場合には自重圧密終了時間が大幅に短くなる反面、体積変化率が無添加時より大きくなり、その結果として埋立層厚が制約されている場合には浚渫土の全量を収容するために必要とする埋立地面積が大きくなることに留意する必要がある。

5. まとめ

浚渫土スラリーの沈降特性に及ぼす凝集剤の影響を検討するため、現地粘土と高分子凝集剤を用いた実験を行った。この結果、明らかになった点を要約すると以下のとおりである。

- (1) 沈降・堆積過程における界面沈降速度は w_0 を初期含水比、 k_e をスラリーの性状による係数としたとき $w_0 k_e$ に比例する。凝集剤を添加した場合には、界面沈降速度は増加するが、界面沈降速度が最大となる凝集剤添加率は残留濁度が最小となる凝集剤添加率よりも大きい。
- (2) 沈降・堆積過程終了時の堆積土高さは H_c を実質土量高さ、 k_d をスラリーの性状による係数としたとき $H_c k_d$ に比例する。ただし、初期含水比が高いほど堆積土高さは高くなる。凝集剤を添加した場合には、無添加の場合よりも低くなる。
- (3) 沈降・堆積過程終了までの経過時間は k_d' をスラリーの性状による係数としたとき $H_c k_d'$ に比例する。凝集剤を添加した場合には、無添加の場合よりも短くなる。
- (4) 圧密沈降過程における圧密沈降係数は初期高さにかかわらず一定であり、初期含水比の増加にとまない増加する。凝集剤を添加した場合には、無添加の場合よりも小さくなる。
- (5) 自重圧密終了時の堆積土高さを堆積土の最終高さとしたとき、堆積土の最終高さは初期含水比に依存せず、 k_c をスラリーの性状による係数としたとき $H_c k_c$ に比例する。凝集剤を添加した場合には、無添加の場合よりも高くなる。
- (6) 自重圧密終了までの経過時間と実質土量高さの間には沈降・堆積過程終了までの経過時間についての関係と同様な関係がある。凝集剤を添加した場合についても、自重圧密終了までの経過時間は無添加の場合よりも短くなる。
- (7) 埋立てに伴う体積変化率は埋立層厚が大きくなるほど

ど小さくなる。凝集剤を添加した場合には、無添加の場合よりも大きくなる。

6. あとがき

浚渫土スラリーの沈降特性に及ぼす凝集剤の影響について実験的検討を行った。この結果、界面沈降速度、堆積土の最終高さ等の沈降特性に及ぼす凝集剤の影響が明らかになり、埋立地の計画等に際しては、この点について十分、配慮することの必要性が裏付けられた。

もとより本研究は特定の現地粘土を用いてなされたものであり、ここで得られた研究成果をそのまま一般的に拡張することはできないであろうが、現実の浚渫・埋立工事に際し、その対象となる現地粘土を用いて行う試験結果の解析等に対して有益な知見を提供するものと考えられる。

また、本研究では4.4で一部、実際的な問題に触れたが、全体としては基礎的研究の範囲にある。埋立地内における現象は複雑であり、浚渫土スラリーの沈降特性からすべてが説明できるわけではないが、基礎的研究で得られた知見を実際的な問題に応用するためには、その前提として現地調査、模型実験等により埋立地内における浚渫土の流動状況等を仔細に把握し、さらにそれをモデル化して行く必要がある。

(1986年9月30日受付)

参考文献

- 1) 中國嘉治・安立重昭・竹内孝之・蔵谷 満：排出された砂と粘土の混合土砂の分級・堆積に関する実験、港湾技研資料，No.525，1985年。
- 2) 安立重昭：塩水中におけるベントナイトのフロック形成について、港湾技研資料，No.421，1982年。
- 3) Imai, G. : Settling behavior of clay suspension, *Soils and Foundations*, Vol.20, No.2, 1980年, pp.61~77.
- 4) Kynch, G.J. : A theory of Sedimentation, *Trans. Faraday Society*, Vol.48, 1952年, pp.166~176.
- 5) 矢野弘一郎：浚渫粘土による軟弱埋立地盤の性状とその予測，土木学会論文集，No.364/Ⅲ-4，1985年，pp.1~14.
- 6) 吉岡直哉・堀田 豊・田中 晋：均質スラリーの回分沈降における諸特性，化学工学，Vol.19, No.12, 1955年，pp.616~625.
- 7) 穂積 準：凝集性スラリーの圧縮沈降特性に関する研究(I)―圧縮沈降速度の検討および初高，初濃度の影響―，水道協会雑誌，No.514, 1977年，pp.2~16.
- 8) 穂積 準・河野芳宣：圧縮沈降領域における活性汚泥スラリーの沈降性状，下水道協会誌，No.184,

1979年，pp.19~27.

- 9) 山内豊聡・上浜暉男・石橋偵造・矢野弘一郎：博多湾浚渫泥土の土質諸特性，土と基礎，Vol.31, No.6, 1983年，pp.39~44.
- 10) 柳瀬重靖・光本 司：凝集沈澱剤による泥水処理効果について，港湾技研資料，No.63, 1969年。
- 11) Imai, G., Tsuruya, K. and Yano, K. : A treatment of salinity in water content determination of very soft clays, *Soils and Foundations*, Vol.19, No.3, 1979年, pp.84~89.
- 12) 丹保憲仁・阿部庄治郎：上昇流式沈でん池におけるフロックブランケットの挙動(I)，水道協会雑誌，No.415, 1969年，pp.7~15.

記号一覧

- A : 埋立地の面積
 a, a', a'' : スラリーに関する定数
 b, b', b'' : スラリーに関する定数
 C_0 : スラリーの初期濃度
 C_p : 凝集剤添加濃度
 C_s : 圧密沈降係数
 e_0 : 堆積直後の堆積土の間隙比
 e_s : スラリーの外部間隙比
 \bar{e}_{t1} : 沈降・堆積過程終了時における堆積土の平均間隙比
 G_s : 土粒子の比重
 G_w : 海水の比重
 H : スラリーの界面高さ
 H_0 : スラリーの初期高さ
 H_c : 埋立層厚
 H_s : スラリーの実質土量高さ
 H_{t1} : 沈降・堆積過程終了時の堆積土高さ
 H_{t2} : 堆積土の最終高さ(自重圧密終了時の堆積土高さ)
 H_∞ : 最終界面高さ
 h_c : 堆積土の最終高さについてのスラリーの性状による係数
 h_d, h_d' : 沈降・堆積過程終了点についてのスラリーの性状による係数
 h_s : 界面沈降速度についてのスラリーの性状による係数
 h_t : 圧密沈降過程についてのスラリーの性状による係数
 k_c : 堆積土の最終高さについてのスラリーの性状による係数
 k_d, k_d' : 沈降・堆積過程終了点についてのスラリー

	の性状による係数	v_s	: 沈降・堆積過程における界面沈降速度
k_s	: 界面沈降速度についてのスラリーの性状による係数	v_t	: 粒子群を構成する単一粒子の終末沈降速度
n	: 界面沈降速度に関する指数	w	: 塩分の影響を補正した真の含水比
S_α	: 凝集剤添加時の堆積土最終高さの無添加時に対する比	w'	: 通常の方法で求めた含水比
T_b	: 残留濁度	w_0	: スラリーの初期含水比
T_α	: 凝集剤添加時の自重圧密終了時間の無添加時に対する比	w_i	: 浚渫土の自然含水比
t	: 沈降開始後の経過時間	\bar{w}_{t1}	: 沈降・堆積過程終了時における堆積土の平均含水比
t_1	: 沈降・堆積過程終了までの経過時間	α	: 凝集剤添加率
t_2	: 自重圧密終了までの経過時間	α_s	: 沈降速度を最大にする凝集剤添加率
V_c	: 最終的な埋立土の体積	α_t	: 残留濁度を最小にする凝集剤添加率
V_i	: 浚渫土量	β	: 海水中に含まれている塩分重量の真水重量に対する比
V_s	: 浚渫土に含まれる土粒子の体積	ζ	: 体積変化率

港湾技研資料 No.568

1986・12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 木峯社 つばさ印刷技研

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.