

港湾技研資料

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

No.680 June 1990

沈降過程を考慮した超軟弱粘土の自重圧密解析

小 林 正 樹
山 川 匠
小 川 富美子

運輸省港湾技術研究所



Settling and Consolidation Analysis of Very Soft Clay

Masaki KOBAYASHI*
Takumi YAMAKAWA**
Fumiko OGAWA**

Synopsis

This paper presents a new procedure for analysing settling and consolidation of very soft clay. In this procedure, both settling and self weight consolidation behaviour can be predicted by using the conventional consolidation theory. The linear relationship between the logarithm of the specific volume $\log(1+e)$ and the logarithm of the consolidation pressure $\log p$ was assumed. The coefficient of permeability was assumed to be a non-continuous function of the void ratio ; permeability changes abruptly when the settling stage is completed and the consolidation starts.

Based on these assumptions, we analysed results of settling tests where the settling behaviour and the subsequent self weight consolidation were carefully observed by using a large settling tube. The prediction agreed favorably with the experimental results.

Key Words: Consolidation, Settlement, Clay, Finite Element Method

* Chief of Soil Mechanics Laboratory, Geotechnical Engineering Division
** Member of Soil Mechanics Laboratory, Geotechnical Engineering Division

沈降過程を考慮した超軟弱粘土の自重圧密解析

小林 正樹*
山川 匠**
小川 富美子**

要 旨

本資料は、通常の圧密理論を用いて超軟弱粘土の沈降・自重圧密解析を行うための手法を開発した結果を紹介するものである。この手法においては、粘土の体積比の対数と圧密圧力の対数が比例関係にあると仮定する。また、透水係数は間隙比の関数とし、沈降が終了して圧密が開始すると、透水係数が不連続的に変化すると仮定している。

このような仮定に基づいて、沈降実験の解析を行った。実験においては、大型の沈降円筒を用いて、超軟弱粘土の沈降およびその後の自重圧密特性を調べている。解析結果は実験結果と良好な一致を示した。

キーワード： 圧密，沈下，粘土，有限要素法

1. まえがき

我が国の港湾は軟弱粘性土地盤地域に立地しているものが多い。軟弱地盤地域における港湾において浚渫を行うためには、超軟弱な液状粘土を処分しなければならない。このような土砂処分のために、埋立地を超軟弱な液状粘土で造成することも多い。超軟弱な粘土を埋立地に投入すると、最初は粘土粒子が沈降し、沈降が終了して堆積した粘土に対して自重による圧密沈下が進行する。圧密による沈下は非常に長期間継続するために、沈下の予測は、埋立土砂量の把握および造成地の有効利用のために非常に大きな問題となる。沈降と圧密はその挙動が大きく異なるために、これまではまったく別個に取り扱われてきた。しかし、精度の高い自重圧密解析を行うためには、沈降過程を十分考慮した解析が必要となってきた。

また、海外技術協力の際に、シルテーションの問題が近年非常に重要性を増してきている。シルテーションとは、超軟弱な粘性土が波や流れにより運ばれ、航路や泊地に堆積することであり、港湾施設に多大の影響を与える。シルテーションの問題を解決するためには、超軟弱な液状粘土の沈降・堆積・圧密特性を総合的に把握しなければならない。

このような観点から、超軟弱な液状粘土の沈降・圧密の挙動を実験室で調査し、その結果を基にして、沈降と圧密の両者を解析できるような手法を開発したのでこ

に報告する。

2. 超軟弱粘土の沈降・圧密特性

超軟弱な液状粘土の沈降は、土の含水比（濃度）と塩分濃度により大幅に挙動が異なってくる。図-1は、その傾向を模式的に示したものである。図には、縦軸に含水比、横軸に塩分濃度をとっているが、沈降特性は含水比と塩分濃度に応じてⅠ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳと分類される4種類の沈降の形式があることがわかっている¹⁾。

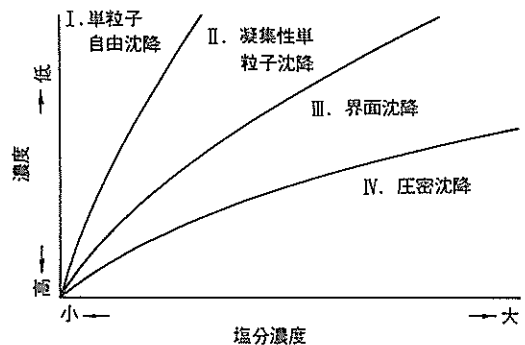


図-1 沈降様式の種類

Ⅰは単粒子自由沈降と呼ばれ、塩分濃度が低く、しかも含水比が大きい（濃度が小さい）場合に生じるものであり、粘土の土粒子が相互に干渉せずに、単一粒子として沈降する。したがって、この場合の沈降速度は土粒

* 土質部 土性研究室長
** 土質部 土性研究室

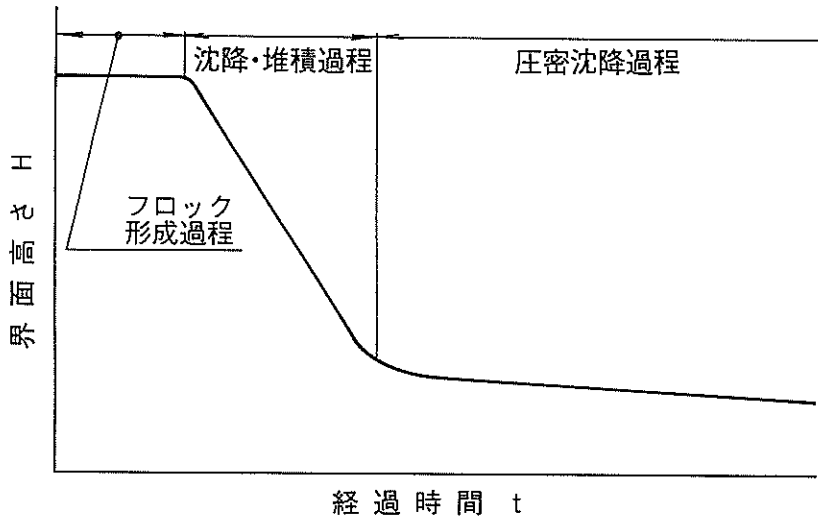


図-2 界面高さと時間の関係

子の粒径から Stokes 式を用いて求めた値に近い。

塩分濃度が大きくなると、含水比が大きい場合でも、土粒子は相互に作用し凝集する傾向がみられ、IIの凝集性単粒子沈降が生じる。この場合は、土粒子は凝集してフロックが形成されるために、その沈降速度は粒径から推定されるものよりも大きな値となる。

IIの凝集性単粒子沈降ではフロックは形成されるが、それぞれのフロックは一つの粒子として自由に沈降する。しかし、含水比が小さくなると、フロック相互が互いに干渉し、個々のフロックが相対的な位置を変えずに全体が一体となって沈降する。このような場合は、水と土の間に明瞭な境界面が認められるIIIの界面沈降が生じる。

さらに含水比が低くなると、明確な沈降現象はみられず、自重圧密が最初から始まるようになり、IVの圧密沈降が生じる。この場合は、沈降過程が生じないので通常の圧密解析法で自重圧密を計算できることになる。

埋立地の自重圧密やシルテーションで問題となるような沈降は、上記のうちIIの凝集性単粒子沈降とIIIの界面沈降が主である。しかし、今回の目的は、沈降過程を考慮して沈降と圧密を連続的に解析することにあるので、界面が発生せず、沈下を定義できない凝集性単粒子沈降は今回の研究の範囲外とした。ただし比較のために、凝集性単粒子沈降試験を行っているの、参考のためにその結果を付録Aに示した。

界面沈降を生じるような場合の液状粘土の沈降特性は、沈降試験から推定することができる。沈降試験の結果から得られる界面高さと時間の関係は、図-2のような傾向となるのが一般的である¹⁾。この図に示されるように、

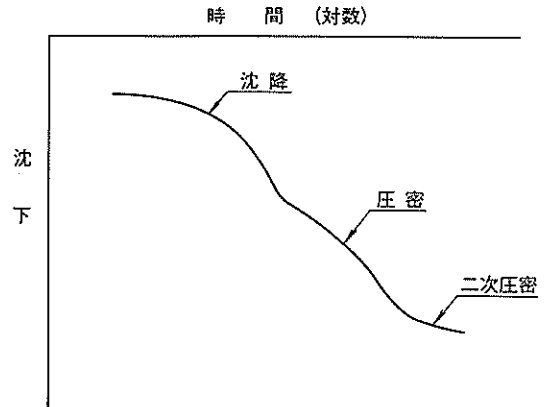


図-3 界面高さと時間の対数の関係

初期の段階では沈降による界面の低下が生じるが、沈降が終了して堆積した底泥には、その後圧密沈下による界面の低下が発生する。したがって、図中の後半の部分に着目すると、圧密特性に関する情報が得られることになる。圧密特性を検討する際には、図-3のように時間の対数に関して沈下をプロットするとさらに明確となる。この図からわかるように、沈降終了後の底泥には一次圧密とその後の二次圧密による沈下が生じている。

初期含水比が小さく、最初から自重圧密が発生するような場合には、粘土の自重を考慮した圧密理論を用いて沈下解析を行えばよい。しかし、初期含水比が大きくて、自重圧密の前に沈降過程が生じるような場合には、沈降過程をも考慮した圧密解析を行わなければならない。

沈降とその後の圧密が実際にどのように進行するか

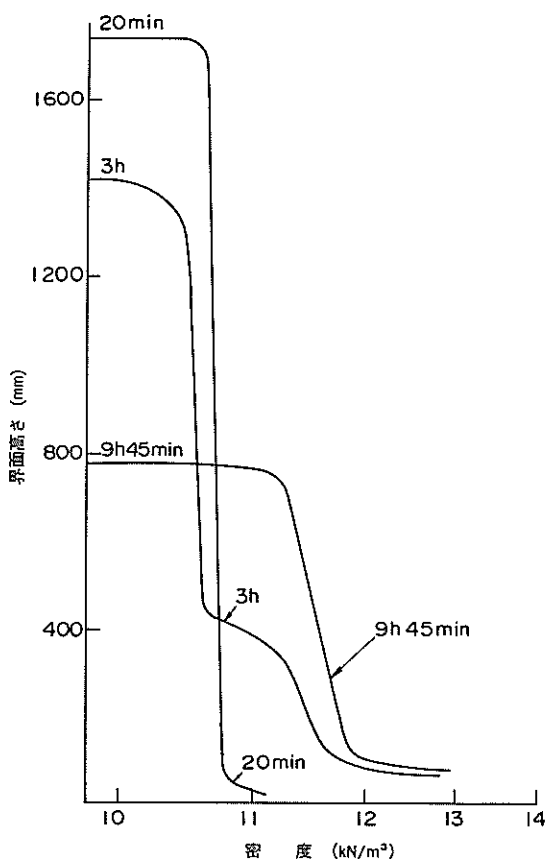


図-4 沈降試験における粘土の密度の深度分布

関しては、興味深い沈降試験結果が報告されている²⁾。この試験においては、沈降・圧密中の粘土の密度が深度方向にX線を用いて測定されている。図-4は結果の一例を示したものであり、沈降開始後20分、3時間および9時間45分後の粘土の密度の深度分布を示している。この試験は、初期高さ1,742mm、初期密度10.7 kN/m³ (1.09 g/cm³)に対するものである。図-4をみると、沈降開始後20分においては、粘土の上部の密度はほとんど初期密度と変わらず、土粒子が沈降しているのがわかる。しかし、底部においては密度が増加しており、この部分では沈降が終了して圧密が進行していることがうかがえる。時間が進行して3時間後になると、上部の約1,000mmの部分は密度は一定であり、まだ沈降過程にあると思われるが、初期密度より若干密度が減少している。高さが400mm付近には密度が急変する部分が見られ、粘土が圧密され堆積土が生じていることが認められる。それ以深では、圧密現象により密度が漸増している。時間がさらに経過して9時間45分後になると、沈降部分は消滅し、すべての深度で粘土は圧密による密度増加

がみられる。この図から、沈降から圧密に移行し、最終的に粘土が堆積していく現象は複雑な過程を経ていることがわかる。このような現象を再現するためには、沈降と圧密の両者を十分考慮した解析法が必要である。

沈降過程は、粘土粒子が互いにまだ十分な応力を伝えられないような状態、つまり有効応力がほぼゼロの状態で重力によって落下するために生じるものである。したがって、通常の圧密理論のように有効応力の変化によって沈下が進行すると考えるようなモデルでは解析が困難である。これまでに行われてきた解析法では、沈降と圧密をまったく別個のものとして取扱い、沈降終了後に自重圧密が始まると考えるようなものが多い。しかし、実際の液状粘土においては、沈降過程の途中段階においても下部の試料ではすでに圧密が開始しており、沈降と圧密をまったく別個のものとして解析する方法には多くの矛盾を含んでいる。

沈降過程は粘土の有効応力がゼロの状態ですりつぶされて落下していくものと考えられるが、見方を変えて土粒子を固定して考えると、粘土中を水が抜けていく現象とも考えられる。このような考え方によると、沈降速度は透水係数を表わすものといえる。実際、三笠による自重を考慮した圧密理論によると、透水係数は、沈降速度から次式のようにして求められることが示されている³⁾。

$$v = k \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (1)$$

ここに、 v は沈降速度、 k は透水係数、 γ' は土の有効単位体積重量、 γ_w は水の単位体積重量である。

上式は、沈降速度から透水係数を求めることにより、圧密理論によって沈降過程の解析が行えることを示唆している。しかし、三笠が式を提示したのは1960年代であるにもかかわらず、これまで式(1)を用いて実際に沈降過程をも考慮した自重圧密解析を行った結果は、筆者らの知る限りではまだ報告されていない。本資料では、沈降過程をも考慮できるような自重圧密解析法を開発した結果を報告する。

3. 沈降・圧密試験

3.1 試験の種類

自重圧密解析を行うためには、間隙比と圧密圧力の関係および間隙比と透水係数の関係が必要となる。両者の関係は、通常の圧密試験を行うことによって求められる。なお、後者の関係は、通常の圧密試験の整理法で用いられる、圧密圧力と圧密係数の関係でも代用できる。しかし、圧密係数はなんらかの圧密理論を介して導き出され

る定数であり、その定義は透水係数ほど自明のものではない。今回の解析においては、Biot の圧密理論を基本として計算を行っている。Biot の方程式は透水係数を用いて構成されており、その点からも透水係数を基本とするのが便利である。

今回の解析では、沈降過程も対象とするので、沈降過程における同様の定数を求めなければならない。ただし、沈降過程においては、有効応力はゼロとみなしてよいので、間隙比と圧密圧力の関係は不要となる。したがって、間隙比と透水係数の関係のみが必要となる。しかし、透水係数を直接求めるのは困難であるので、ここでは式(1)を用いて沈降試験の結果から得られる沈降速度から透水係数を求めた。

解析に必要な定数を求めるためには、沈降試験と圧密試験を実施すればよい。しかし、通常行われる標準圧密試験では、自重圧密解析が対象とするような低い圧力範囲の試験は不可能である。今回は、特に低い圧力範囲での圧密特性を調べるために、低圧力圧密試験を行った。したがって、実施した試験は、沈降試験、低圧力圧密試験および標準圧密試験の3種類である。

3.2 試料

今回の試験に用いた試料は、東京湾で採取された攪乱試料を調整したものである。この試料の物理特性を表-

1に、粒径加積曲線を図-5に示す。この試料は、砂分を5%程度含んでいるために、沈降試験を行うと分級作用により上部に細粒分、下部に粗粒分が堆積して深度方向に不均一な土になってしまうことが懸念された。この点を検討するために、図-6に示すような直径10cm、高さ180cmの大型沈降円筒を用いて予備の沈降試験を行った。この沈降装置では、試料を攪拌するために、水平回転軸を中心として円筒を回転できるようになっている。図-7はその結果の一例を整理して、堆積した土の粒度分布と深度の関係を示したものである。この図に示されるように、沈降円筒の下部には砂が堆積し、上部の土とはかなり粒度組成が異なり、分級作用が生じていることが明らかである。図-7をみると、砂が堆積するのは、沈降円筒の下部20%以深とみなせるので、全試料に対して事前に沈降試験を行い、沈降円筒の上部80%に堆積した試料のみを採取し、その後の沈降の本試験および圧密試験に用いた。このようにして、調整した後の試料の物理特性を表-2に示す。表-1と表-2を比較すると、試料調整を行うことにより、砂の含有量はほとんどゼロになり、高塑性の試料となっていることが明らかである。

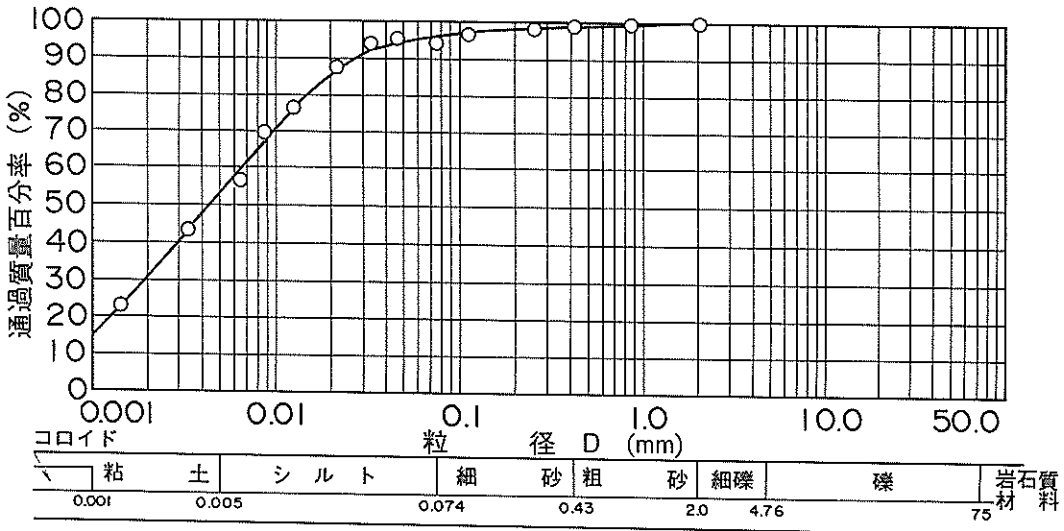


図-5 試料の粒径加積曲線

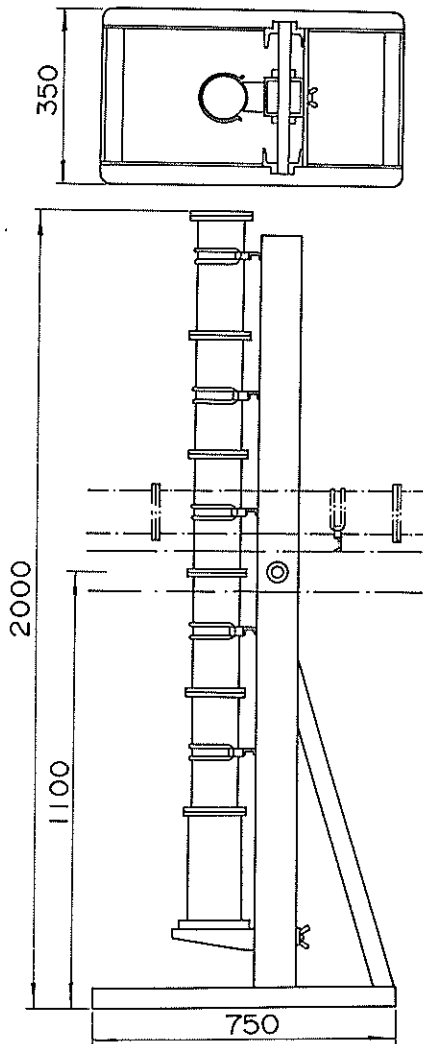


図-6 沈降円筒

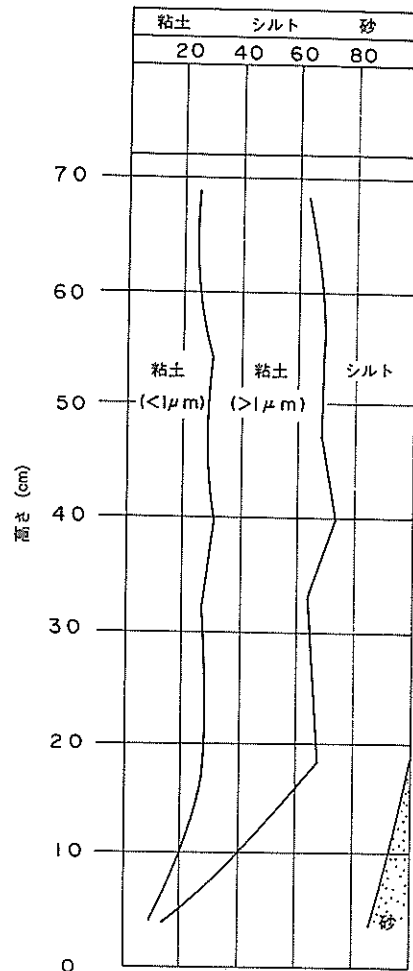


図-7 分級後の粒度組成の深度分布

表-1 試料の物理特性

比重 G_s	コンシステンシー特性			粒 度 組 成		
	2.690	液性限界(%)	W_L	91.3	礫	Gravel (%)
	塑性限界(%)	W_p	43.1	砂	Sand (%)	5.0
	塑性指数	I_p	48.2	シルト	Silt (%)	51.0
	分類	塑性図	$C'H$	粘土	Clay (%)	44.0
				分	三角座標	F

表-2 調整後の試料の物理特性

比重 G_s	コンシステンシー特性			粒 度 組 成		
	2.674	液性限界(%)	W_L	140.8	礫	Gravel (%)
	塑性限界(%)	W_p	53.4	砂	Sand (%)	0.1
	塑性指数	I_p	87.4	シルト	Silt (%)	40.9
	分類	塑性図	CH	粘土	Clay (%)	59.0
				分	三角座標	F

3.3 沈降試験

沈降試験においては、液状粘土を沈降円筒に入れて、試料を十分撈拌して均一にした後に、沈降状態を観察するのが一般的な方法である。今回の解析対象は、界面が生じるような比較的含水比が低い状態のものである。予備実験の結果から界面沈降が生じるような初期含水比が約1,000%~4,000%と判断されたので、990%、1,422%、2,000%、3,370%の4種類の初期含水比の試料に対して試験を行った。なお、ここで示した含水比は塩分補正後のものであり、塩分濃度としては、標準海水の値に近い塩分比 $\beta = 3.5\%$ の条件で試験を行っている。

試験に際しては、初期含水比と塩分濃度から所要の蒸留水、塩および粘土の量を計算し、所定量を計測し、沈降円筒に混入した。沈降円筒の中で試料が均一状態になるように、円筒を回転させることにより十分撈拌した。円筒の回転中の試料の状態を観察すると、回転作業を5分程度継続すると、ほぼ試料が均一になることが確認された。したがって、実際の試験においては、5分間の回転の後に円筒を静置し、その後生じる界面の高さを測定した。なお、比較のために初期含水比の大きな試料に対しても同様の試験を行っているが、その結果は付録Aに示す。

図-8は4種類の初期含水比 w_0 に対して行った沈降試験の結果から得られた、界面の沈下と時間の関係を示したものである。この図から明らかなように、初期の段階では界面高さは時間に比例して沈下している。この段階が沈降過程に対応し、直線部分の勾配から沈降速度を容易に求めることができる。沈降がほぼ終了すると、界面の低下速度は急激に小さくなり、圧密過程に移行する。

圧密過程を検討するためには、沈下と時間の対数で整理した方がよい。図-9は、このような観点から、3種

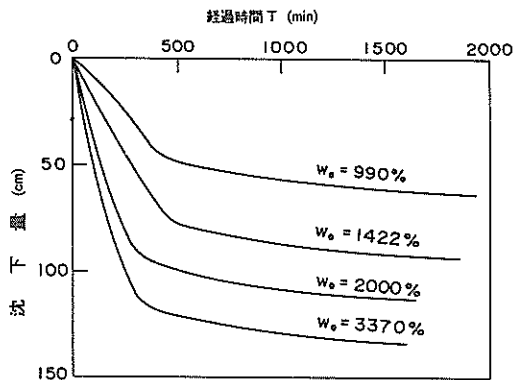


図-8 沈下量と時間の関係

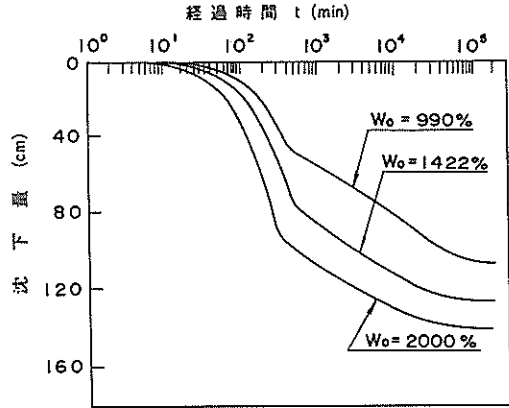


図-9 沈下量と時間の対数の関係

類の初期含水比に対して、沈下と時間の対数の関係を示したものである。なお、図-8に示した最も初期含水比の大きな試料の試験結果においては、沈下が短期間にほぼ終了しており、長期間の測定は行っていないために、図-9からは省いてある。今回の結果を図-3と比較すると、初期の沈降過程、その後の圧密過程および最終的な二次圧密過程が生じていることがわかる。

界面高さとの関係を両対数でプロットすると、圧密過程においては直線関係となることが報告されている⁴⁾。今回の試験結果に対してこのような整理をすると、図-10が得られた。この図をみると、今回の試験結果においても、圧密過程において界面高さの対数と時間の対数の関係がほぼ直線関係となっていることが認められる。

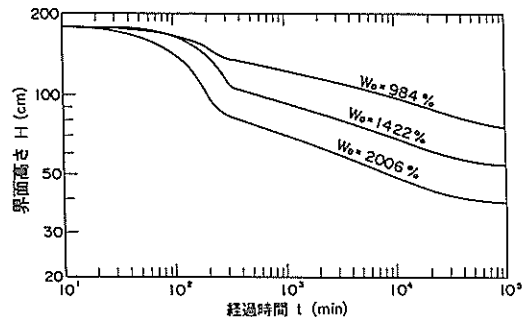


図-10 界面高さの対数と時間の対数の関係

沈降試験結果のうち、沈降過程を考慮した自重圧密解析に必要な定数は沈降速度から求められる透水係数である。図-11は、式(1)を用いて求めた透水係数と間隙比の関係である。ここでは、間隙比として沈降試験直前の初期間隙比を用いて整理している。実際には図-4に示されるように、沈降している液状粘土の密度は時間と

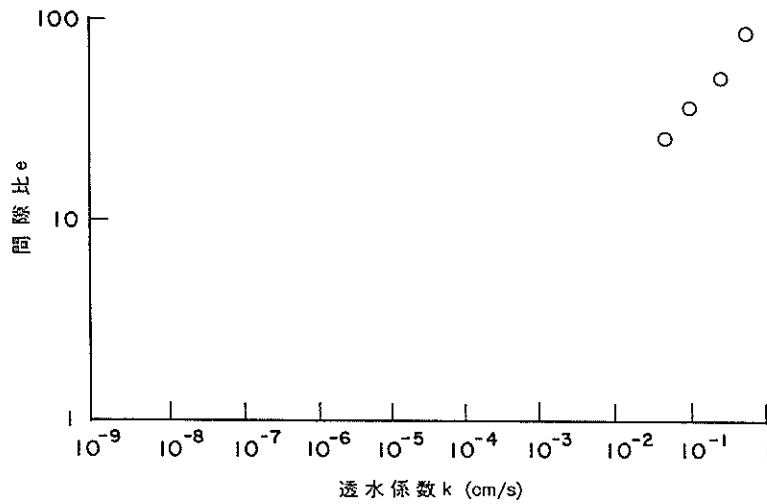


図-11 沈降試験から求めた透水系数と間隙比の関係

もに変化するので、間隙比も変化しているはずである。しかし、この変化量は小さいので、ここではこれを無視して沈降過程中的間隙比は初期間隙比に等しいものと仮定して図-11を求めた。図-11に示されるように、圧密理論から求めた透水系数は初期間隙比によって大きく変化している。沈降状態での液状粘土は有効応力がゼロであり、ほとんど沈降中には間隙比が変化しないと考えると、図-11の関係は透水系数と間隙比の関係を与えていると考えられる。

沈降試験から求められるもう一つの重要な結果は、非常に低い圧力での、間隙比と圧密圧力の関係である。こ

のためには、自重圧密が終了して堆積した粘土の含水比の深度分布を測定すればよい。含水比がわかれば、飽和度を100%として、土粒子の密度から粘土の間隙比および湿潤密度が求められ、間隙比と圧密圧力の関係が導き出される。

今回の試験では、自重圧密がほぼ終了したと判定される時点において、堆積土の含水比を深度方向に約10cm毎に測定している。図-12は、3種類の初期含水比 w_0 に対して、その結果を示したものである。3.2で述べたように、沈降試験に当たっては、事前に沈降円筒によって分級させ、分級後の上部の試料のみを用いているので、砂分は

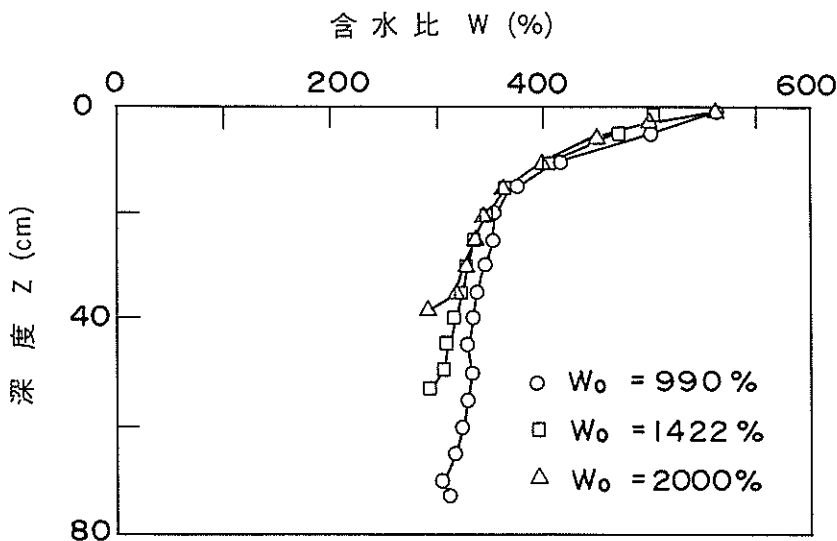


図-12 圧密後の含水比の深度分布

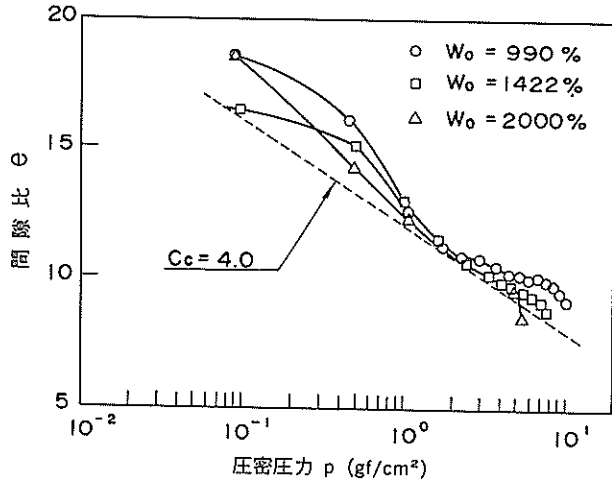


図-13 沈降試験から求めた間隙比と圧密圧力の関係

非常に少なくなっている。しかし、実際にはわずかの砂分がまだ残っているために、沈降試験においても、沈降円筒の底部には砂が堆積する傾向がみられた。図-12をみると、いずれの初期含水比においても、最下部の試料の含水比は他の部分のものと異なるような傾向がみられる。この原因は、わずかな砂分が円筒底部に堆積するためである。

図-13は、図-12の含水比の深度分布から求めた、間隙比と圧密圧力の関係である。この図には大きなばらつきがみられる。超軟弱粘土は含水比が非常に大きいため、わずかの測定誤差が間隙比に大きく影響を及ぼし、ばらつきが大きくなったものと思われる。

3.4 低圧力圧密試験と標準圧密試験

自重圧密解析の際には、通常の標準圧密試験で対象とするような応力範囲よりもかなり低い応力での圧密特性が問題となる。今回はこのために、沈降試験で自重圧密が終了した堆積土に小さな荷重を載荷することにより、低圧力での圧密試験を行った。試料は、初期含水比10,180多のもので、堆積後の高さは10cmであった。圧密圧力は0.0064 kgf/cm²、0.014 kgf/cm² および0.028 kgf/cm² の3段階である。

また、通常の圧力範囲での圧密定数を求めるために、JIS A 1217に基づいて標準圧密試験を行った。試料としては、粘土を堆積させ自重圧密終了後、0.5 kgf/cm²

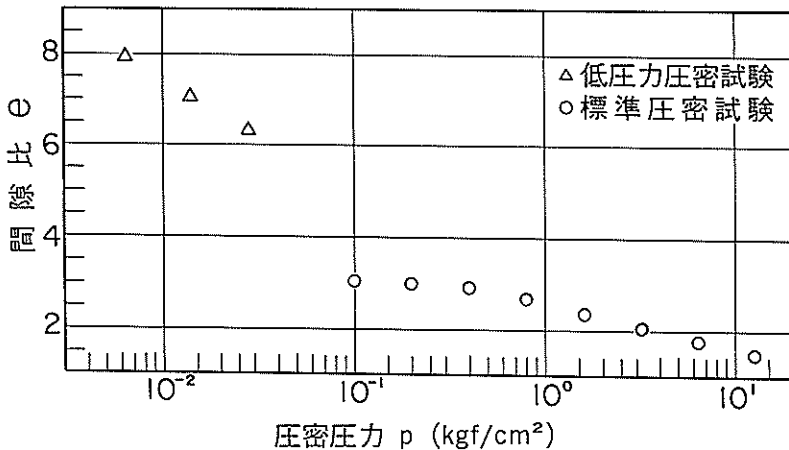


図-14 圧密試験から求めた間隙比と圧密圧力の関係

の圧力であらかじめ圧密させたものを用いている。

図-14は、低圧力圧密試験と標準圧密試験から得られた、間隙比と圧密圧力の関係である。標準圧密試験においては、圧密圧力が 0.4 kgf/cm^2 以下のものは過圧密状態であるので、今回のような液状粘土の解析においては対象外となる。正規圧密状態では、間隙比と圧密圧力の対数が直線関係になる場合が多い。しかし図-14をみると、標準圧密試験における過圧密状態のものを除いても、間隙比と圧密圧力の関係には直線部分を認めにくい。このことは、自重圧密解析を行う際に、通常仮定されている $e - \log p$ の直線関係をそのまま適用するのが

難しいことを示唆している。

図-15は、圧密係数と平均圧密圧力の関係を示したものである。ここでも、標準圧密試験の結果のうち平均圧密圧力が 1 kgf/cm^2 以下のものは過圧密状態となっているので、除外して考えるべきである。正規圧密状態に限れば、図-15をみると、圧密係数は圧密圧力とともに増加している傾向が認められる。したがって、自重圧密が問題となるような圧力範囲に対する圧密係数は、通常の試験で得られるものよりかなり小さい。このような可能性は他の粘土に対しても考えられ、実際に自重圧密解析を行う際には対応する圧力範囲での圧密試験を実施

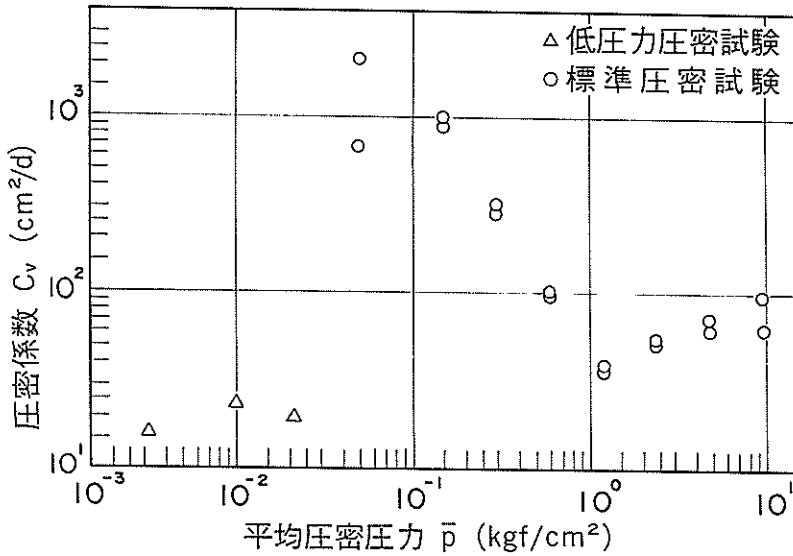


図-15 圧密試験から求めた圧密係数と平均圧密圧力の関係

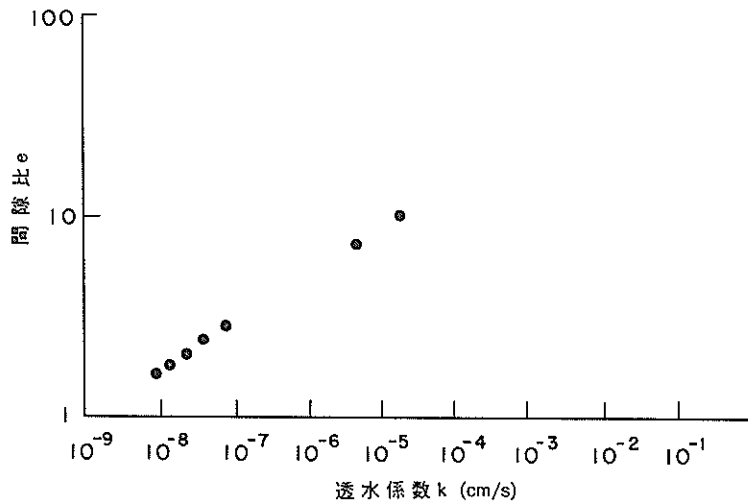


図-16 圧密試験から求めた透水係数と間隙比の関係

しなければならぬ。

今回の解析では、透水係数と間隙比が必要となるので、図-16に透水係数と間隙比の関係を両対数でプロットしている。透水係数を求める際には、一次圧密比による補正を行う考え方と補正をしないものがあるが、今回は補正は行っていない。ただし、間隙比を求める際には、一次圧密比を考慮して、各段階での載荷前の初期間隙比と一次圧密終了時（ d_{100} に対応する値）での間隙比を平均している。

4. 沈降過程を考慮した圧密解析

4.1 圧密方程式と構成方程式

今回の解析では、Biotの三次元圧密理論を基本とした。Biotの圧密方程式は、変位と間隙水圧を未知数とし、両者の相互作用を考慮している。粘土の自重圧密解析は、深さ方向の変位のみを考慮した一次元の問題となるので、Biotの方程式も簡略となり、式(2)、(3)のように表わされる⁵⁾。

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \rho_z = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = k_z \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \rho_f \right) \quad (3)$$

ここに、 z は鉛直座標、 t は時間、 σ_z は鉛直方向の有効応力、 u は間隙水圧、 k_z は鉛直方向の透水係数、 ρ_z は土の湿潤密度、 ρ_f は間隙水の密度、 ζ は間隙水の体積ひずみである。

式(2)は、つり合い方程式と呼ばれるものであり、式(3)は連続方程式と呼ばれ、それぞれ、力のつり合い、間隙水の連続性を表わしている。

有限要素法を用いて、式(2)と式(3)を解くためには、地盤を鉛直方向に有限要素に分割し、各要素の節点において、未知数として、鉛直変位 δ と間隙水圧 u を用いる。このように有限要素を用いて、式(2)と式(3)を定式化すると、式(4)、(5)のようになる。

$$K\delta + Cu = F \quad (4)$$

$$C^T \frac{d}{dt} \delta - E \frac{d}{dt} u - Hu + Q = 0 \quad (5)$$

ここに、 δ 、 u は各節点における鉛直変位と間隙水圧をベクトル表示したもの、 F は各節点に作用する外力ベクトル、 Q は各節点に外から作用する流量ベクトル、 K 、 C 、 F 、 H はそれぞれ剛性マトリックスに対応するものであり、その詳細は文献⁵⁾を参照されたい。

式(5)は時間 t に関する微分を含んでいるので、時間方

向に関して離散化を行う必要がある。このような時間に関して一階の偏微分方程式を離散化すると、次式(6)のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} C^T \delta_{n+1} - Eu_{n+1} - \theta \Delta t Hu_{n+1} \\ - C^T \delta_n + Eu_n - (1-\theta) \Delta t Hu_n \\ + \theta \Delta t Q_{n+1} + (1-\theta) \Delta t Q_n = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、添字 n は時刻 $t = t_0$ における値を表わし、添字 $n+1$ は $t = t_0 + \Delta t$ における値を表わす。また θ は離散化の状態を示すパラメータであり、 $0 \leq \theta \leq 1$ である。特に、 $\theta = 0$ は前進型差分、 $\theta = 1/2$ は中心型差分、 $\theta = 1$ は後退型差分と呼ばれるものである。これらの3種類の θ の値が一般に用いられている。今回の計算においては、最も安定性が良いという理由で、 $\theta = 1$ の後退型の式を用いた⁵⁾。

式(4)と式(6)を合せると、式(7)のように表わされる。

$$K_m a = r \quad (7)$$

ここに、 K_m は全体の剛性マトリックスに対応するもの、 a は未知変位ベクトル、 r は外力ベクトルであり、それぞれ次の式(8)から求められる。

$$\left. \begin{aligned} K_m &= \left[\begin{array}{c|c} K & C \\ \hline C^T & -E - \theta \Delta t H \end{array} \right] \\ a &= \left\{ \begin{array}{c} \delta_{n+1} \\ u_{n+1} \end{array} \right\} \\ r &= \left\{ \begin{array}{c} F_{n+1} \\ \frac{C^T \delta_n - Eu_n + (1-\theta) \Delta t Hu_n - \theta \Delta t Q_{n+1}}{-(1-\theta) \Delta t Q_n} \end{array} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

つまり、式(8)のように各節点における未知数である変位と間隙水圧をまとめて表わすと、圧密解析の場合でも、通常の応力解析における式(7)と同じ型の式が得られることになる。したがって、剛性マトリックスと外力項を式(8)によって適切に求めれば、一般の応力解析と同一の手続で有限要素解析が可能となる。

今回の圧密解析は一次元状態に対するものである。したがって、未知変位は各節点に鉛直方向の1個を考えれば良く、あえて、マトリックス表示を用いる必要もない。しかし、プログラム作成上は、一次元のものも二次元のものも要する作業は大差ない。したがって、二次元条件をも取り扱える方がより実用性が高いと考えて、今回は、二次元状態として有限要素の定式化を行っている。

解析の際には、圧密の基本方程式のほかに、粘土の特性を表わす、いわゆる構成方程式が必要となる。圧密解析の際には、間隙比と圧密圧力の関係および透水係数と間隙比の関係の2種類の構成方程式が必要となる。

図-17は、今回の3種類の試験（沈降試験、低圧力圧密試験、標準圧密試験）の結果をすべてまとめて間隙比 e と圧密圧力 p （対数）の関係を示したものである。したがって、非常に小さな応力範囲から通常の応力範囲までの広範囲の圧力での $e - \log p$ 関係が得られている。ただし、今回の圧密解析は液状粘土の自重圧密を対象としているために、標準圧密試験における過圧密状態の値は対象外となる。通常は、正規圧密状態での $e - \log p$ 関係は直線になるとされているが、自重圧密で対象となるような圧力範囲では、この図に示すように、 $e - \log p$ 関係は直線とはみなし難い。

土の力学モデルを考える際には、 $e - \log p$ 関係を直線とするよりも、 $\log(1+e) - \log p$ 関係を直線と仮定する方がより合理的であるという提案がある⁹⁾。ここで、 $(1+e)$ は体積比 f と呼ばれるもので、間隙比よりもパラメータとして有用であるとされている。図-17に示した試験結果を再整理して、 $\log f - \log p$ の関係をプロットしたものが図-18である。ただし、標準圧密試験の過圧密状態のものは省いている。図-17と図-18を比較すると明らかなように、 $\log f - \log p$ 関係は幅広い応力範囲で直線関係がみられ、 $e - \log p$ 関係を直線と仮定するよりも合理的である。したがって今回の解析では、 $\log f$ と $\log p$ が直線関係にあるとして解析を行っている。

構成方程式として次に必要となるのが、透水係数と間隙比の関係である。今回行った3種類の試験から求めら

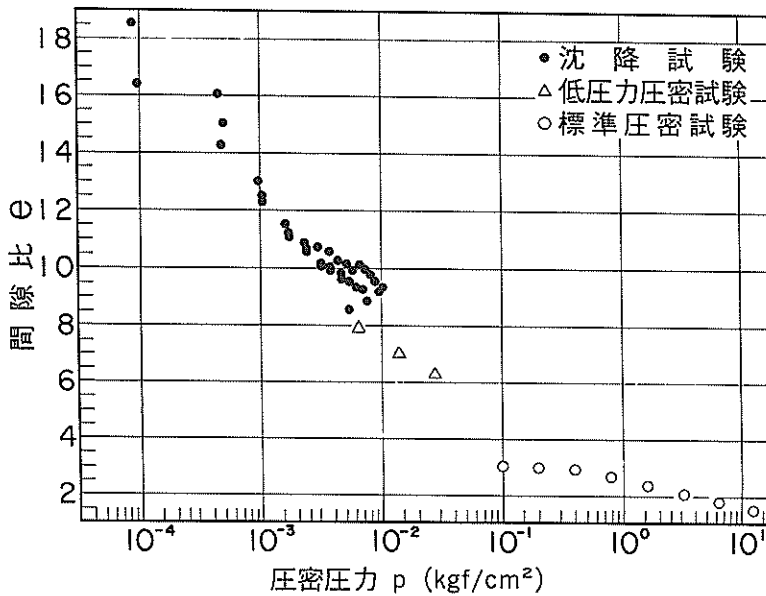


図-17 全試験から求めた間隙比と圧密圧力の対数の関係

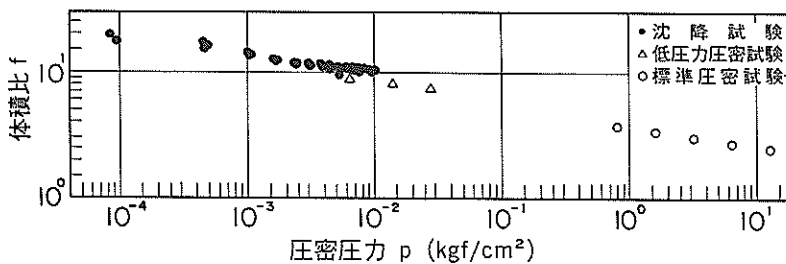


図-18 全試験から求めた体積比の対数と圧密圧力の対数の関係

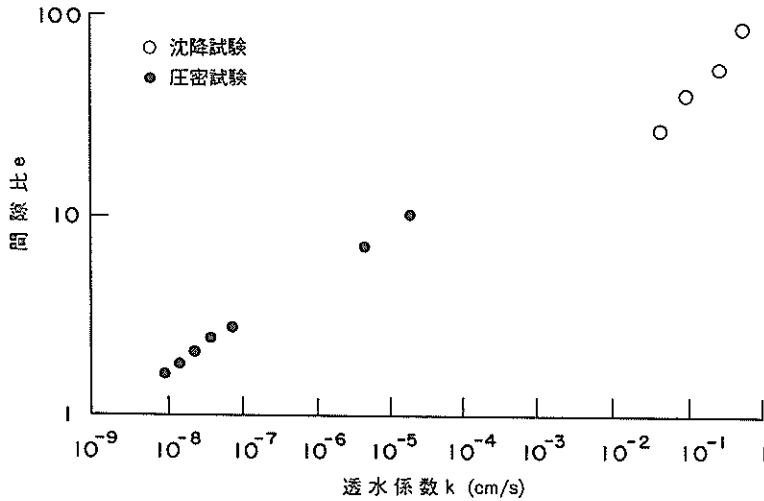


図-19 全試験から求めた透水係数と間隙比の関係

れた透水係数の対数と間隙比の対数の関係を示したものが図-19である。ここで、沈降試験の透水係数は図-11に示したものとまったく同一のものであり、式(1)に基づいて沈降速度を求めている。また、圧密試験から得られた透水係数は、一次圧密補正は行っていないが、間隙比に関しては一次圧密を考慮して補正している。図-19をみると、圧密試験から求めた透水係数は、低圧力から標準的な圧力範囲まで透水係数と間隙比の関係が直線で近似できる。一方、沈降試験から求めた透水係数もほぼ直線で近似できるが、その直線は圧密試験から求めた直線とは大きく異なっている。両者の直線を比較すると、同じ間隙比に対して、沈降試験から求めた透水係数の方が圧密試験から求めた値より大きな傾向がある。沈降過程は土粒子がまだ互いに応力を伝えないような状

態であるために、透水係数が大きく、土が堆積して応力が伝わる圧密過程においては、透水係数が小さくなるものと思われる。つまり、土粒子が分散した状態では透水係数が比較的大きく、土が堆積し始めると、透水係数が急激に減少するものと考えられる。

今回の解析では、図-20に示すように、圧密試験から求めた場合と沈降試験から求めた場合の透水係数の対数と間隙比の対数を直線関係で近似している。ただし、両者の直線は大きく異なっているため、ある限界の間隙比 e_c で透水係数が不連続に変化するとしている。今回の試験結果から限界の間隙比 e_c を明確に求めるのは難しいので、実際には、 e_c を種々に変化させて計算を行い、最も試験結果を再現できるような e_c の値を求めている。

4.2 解析手法

今回の解析では、次式のように、体積比 f と圧密圧力 p が両対数でプロットすると直線関係にあるとしている。

$$\log f = a + b \cdot \log p \quad (9)$$

ここに、 a と b は実験定数であり、図-18の結果から求めるものである。

式(9)のような f と p の関係はきわめて非線形性の強いものであるために、なんらかの反復計算を行わなければならない。反復計算法としては各種の手法が提案されているが、ここでは最も安定性の高い手法として評価の高い、仮想的な弾・粘塑性理論に基づく方法⁷⁾を用いている。この方法は、反復計算の代わりに、仮想的な時間を導入し、時間に関して積分を行うことにより非線形問題

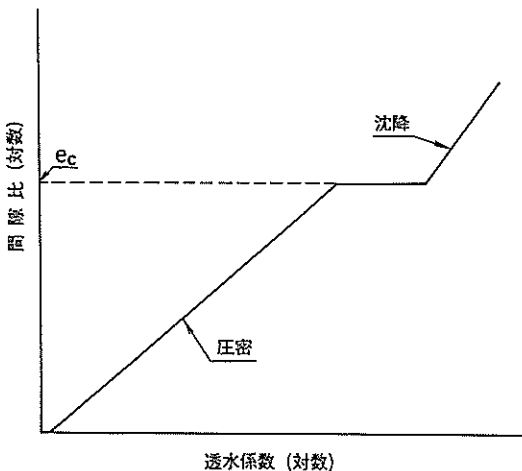


図-20 透水係数と間隙比の関係の模式図

を解くものである。実際に式を用いる際には、圧密圧力 p の対数を計算する必要があるため、圧密圧力 p が負になると計算が不可能となる。最終的な p の値は負の値にはならず、必ず正の値となるはずである。しかし、反復計算の途中では、 p が負になることもあるので、式(9)のような表現は反復計算には適していない。したがって、今回の解析では式(9)を変形して次式のような関係を用いている。

$$p = \exp \left\{ \frac{\log f - a}{b} \right\} \quad (10)$$

実際の計算では、次式のように降伏関数 F を定義して、 F の値がゼロになるまで時間に関して積分するという手法を用いている。

$$F = p - \exp \left\{ \frac{\log f - a}{b} \right\} \quad (11)$$

4.3 解析結果

図-9 に示した3種類の初期含水比に対して、4.2 で設定した定数を用いて自重圧密解析を行った。この結果を沈下と時間の対数に関して、実験値と比較して示したものが図-21 である。この図をみると、実験値と計算値にはやや相違がみられるが、沈降過程から圧密過程に移行する傾向を計算値はよく再現しているといえる。したがって、沈降に対応するような低い圧密圧力と圧密に対応する通常の圧力範囲で透水係数を不連続に変化させることにより、通常の圧密計算法で沈降過程をうまく再

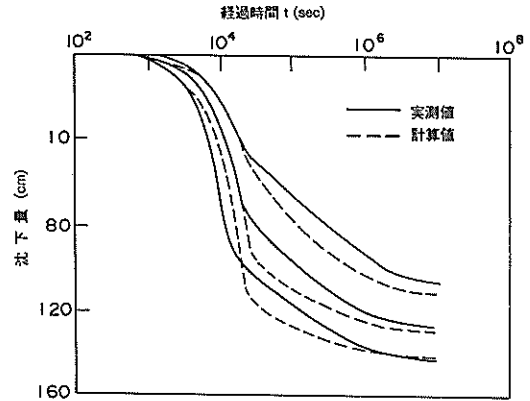


図-21 沈下-時間(対数)関係の実測値と計算値の比較

現できることを示唆している。

図-22 は、沈降および圧密過程で密度の深度分布がどのように変化して行くかを示したものである。2.で示した実験結果の図-4 によると、沈降から圧密に移行する途中段階においては、ある深度で密度が急変する傾向が認められた。図-22 をみると、解析結果においてもこのような現象がうまく再現されていることが明確である。したがって、今回のような単純な仮定によっても、沈降過程の様子を予測できることを示している。

比較のために、これまで行われてきた通常の自重圧密解析を行った結果を図-23 に示した。ここでは、 $e - \log p$ 関係を直線と仮定し、圧縮指数 $C_c = 4.0$ 、圧密係数 $c_v = 0.02 \text{ cm}^2/\text{min}$ と一定の値を用いている。なお、初期間隙比 e_0 は全ての初期濃度に対して $e_0 = 20.0$ と

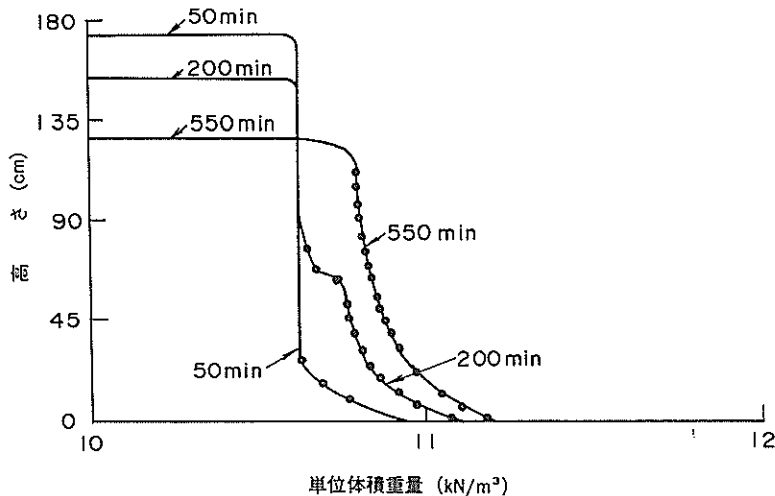


図-22 解析による粘土の密度の深度分布

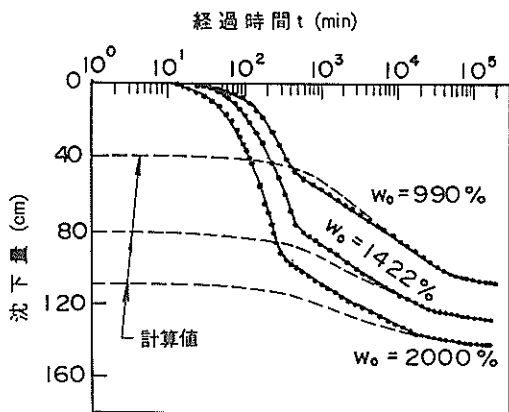


図-23 沈下-時間(対数)関係の実測値と計算値(従来法)の比較

いう一定の値を用いている。図-22と図-23を比較すると明らかなように、通常の自重圧密解析では初期の沈降過程がまったく再現できないのに対して、今回開発した方法を用いることにより、沈降過程をも考慮した超軟弱粘土の自重圧密解析が可能となることがわかる。

5. 結 論

超軟弱な液状粘土の沈降と圧密を総合的に解析できるような手法を開発するために、大型沈降円筒を用いた沈降試験および圧密試験を行い、それらの結果に基づいて有限要素法による数値解析を行った。本研究によって得られた結論は以下のようにまとめられる。

- (1) 沈降試験と圧密試験の結果によると、間隙比 e と圧密圧力 p の対数の関係を示す $e - \log p$ 曲線は正規圧密状態でも直線とはならない。これを再整理して体積比 f ($f = 1 + e$) の対数を圧密圧力の対数に対してプロットすると、幅広い圧力範囲で直線

的な関係が得られた。

- (2) 圧密試験の結果によると、圧密圧力が小さいほど圧密係数が小さくなる。
- (3) 透水係数の対数と間隙比の対数をプロットすると、沈降試験および圧密試験ともに良好な直線関係が得られる。しかし、両者の直線関係には大きな相違がみられ、沈降から圧密に移行する際に、透水係数が急激に変化する傾向が認められる。
- (4) 体積比の対数と圧密圧力の直線関係を仮定し、沈降過程から圧密過程に移行する際に透水係数が急激に変化するとして、有限要素法による自重圧密解析を行う方法を開発した。この方法を用いることにより、沈降および圧密の両者を考慮した自重圧密解析が可能となる。

(1990年3月31日受付)

参 考 文 献

- 1) 今井五郎：液状粘土の一次元圧密特性に関する基礎的研究，東京大学博士論文，1978年。
- 2) Been, K. and Sills, G. C. : Self-weight consolidation of soft soils : an experimental and theoretical study, *Geotechnique* Vol.31, No.4, 1981.
- 3) 三笠正人：軟弱粘土の圧密，鹿島出版会，1963年。
- 4) 矢野弘一郎：液状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，第364号，1985年。
- 5) 小林正樹：有限要素法による圧密問題の解析，港湾技研資料，No.247，1976年。
- 6) Butterfield, R. : A natural compression law for soils (an advance on $e - \log p'$), *Geotechnique* Vol.29, No.4, 1979.
- 7) 小林正樹：非線形一次元圧密沈下の解析法とその適用，港湾技術研究所報告，第21巻，第1号，1982年。

付録A. 凝集性単粒子沈降試験

今回行った凝集性単粒子沈降に対応する沈降試験での初期濃度は、 1 g/l (含水比 $100,000\%$)、 5 g/l (含水比 $20,000\%$)、 10 g/l (含水比 $10,000\%$) の3種類である。ここで含水比は塩分補正をした値を示している。なお、塩分濃度は標準海水の値に近い塩分比 $\beta = 35\%$ で試験を行った。

(1) 沈降速度の求め方

凝集性単粒子沈降のように界面が明確に認められない場合は、濃度の深度分布を時間とともに測定し、濃度の変化を調べることで、沈降速度を求めることができる。この場合、沈降速度を求めるには2種類の方法がある。

最初の方法は、土が均一であると仮定し、沈降速度は濃度のみの関数と考える方法である。このような観点からすると、濃度の深度分布の時間的変化がわかると次のような手順で沈降速度を求めることができる。

沈降円筒での濃度 C は、深さ z と時間 t の関数である。沈降速度を w とすると、 C と w の関係は次式で与えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (w \cdot C)}{\partial z} = 0$$

上式を z に関して積分すると、

$$(w \cdot C)_{z=D} = - \frac{\partial}{\partial t} \int_0^D C dz$$

この式を用いれば、濃度の深度分布を時間とともに測定することにより、沈降速度を求めることができる。具体的には、例えば図-A.1に示すような濃度分布がある時間 t_1 と t_2 において測定されたとすると、ある深さ D での沈降速度を求めるためには、それぞれの時間での濃度分布を表面から深さ D まで積分し、それを時間で微分した後に、 D 点での濃度で割ればよい。つまり、 $OABD$ と $O A' B' D$ の面積の差を S とすると、沈降速度 $w = S / (t_1 - t_2) / C_{z=D}$ となる。

図-A.2は、今回の凝集性単粒子沈降に属する試験から得られた、濃度の深度分布と時間の関係の一例を示したものである。実際に濃度を測定するためには、かなりの量の泥水を採取してそのSSを測定しなければならない。したがって、その後の沈降は採水の影響を受けて大きく変化する恐れがある。今回の試験ではこの影響をなくすために、採水の回数だけ同一の条件で試験を反復して実施している。

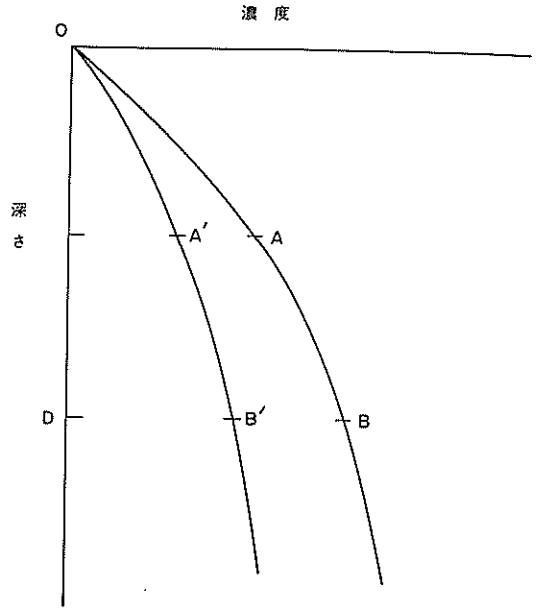


図-A.1 濃度分布を用いた沈降速度の計算法

図-A.3～図-A.5は、このようにして求められた、沈降速度 W と濃度 SS の関係を3種類の初期濃度に対してそれぞれ示したものであり、図-A.6は3種類の初期濃度の結果をまとめて示したものである。ただしここで濃度は、初期濃度ではなく、沈降速度を求めたそれぞれの時点と深さでの濃度に対応していることに注意しなければならない。実際の沈降速度は、初期濃度ではなくそれぞれの時点における濃度の関数と考えた方がよいために、このような整理を行っている。この図より明らかのように、沈降速度は濃度の増加とともにある点までは増加する傾向があり、その後は急激に減少する。参考のために、界面沈降から求めた初期濃度と沈降速度の関係を□印で示した。界面沈降の場合でも、界面下の濃度が常に初期濃度と等しければ、その沈降速度はここで定義したような沈降速度と等価なものとなる。

上記の方法は、沈降速度が濃度の関数として一義的に求められるので、実際にシルテーションのシミュレーション等を行う際には非常に便利である。しかし、実際の土は一つの粒径から構成されているわけではなく、様々な粒径から構成されており、土が濃度だけに依存した単一の沈降速度を有しているとは考えにくい。このような観点から、一つの土に対して沈降速度の分布を考えて、下記のような考え方で沈降速度加積曲線を求める方法もある。

沈降円筒内で初期の濃度が一様であるとすると、ある時刻 t における深さ D の点を考えると、沈降速度が D/t

SS 濃度鉛直分布の経時変化 初期濃度 1,000mg/ℓ

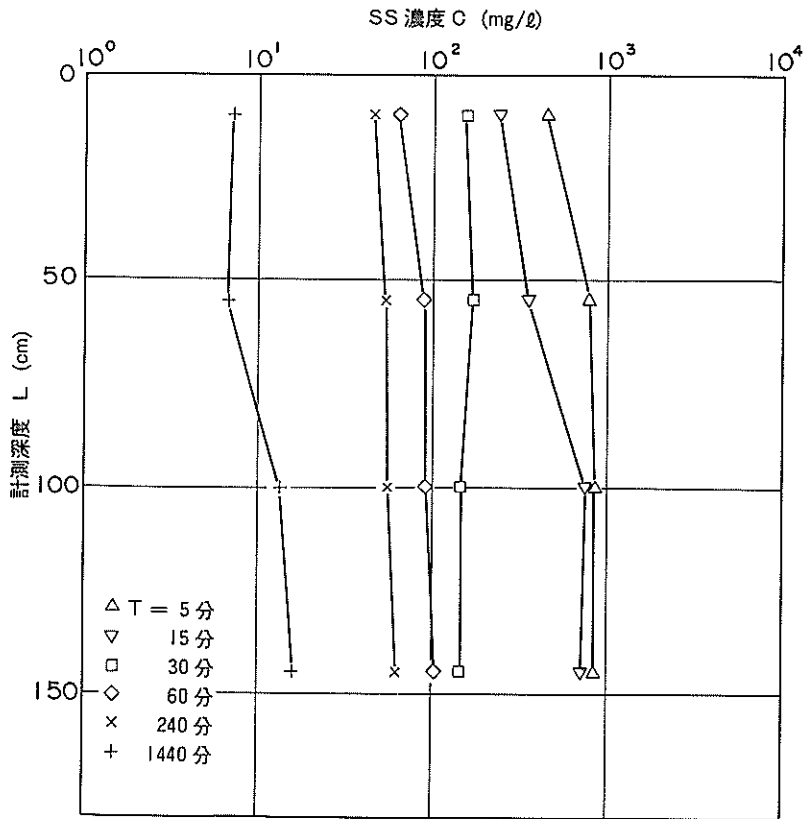


図 - A . 2 濃度分布の経時変化の一例

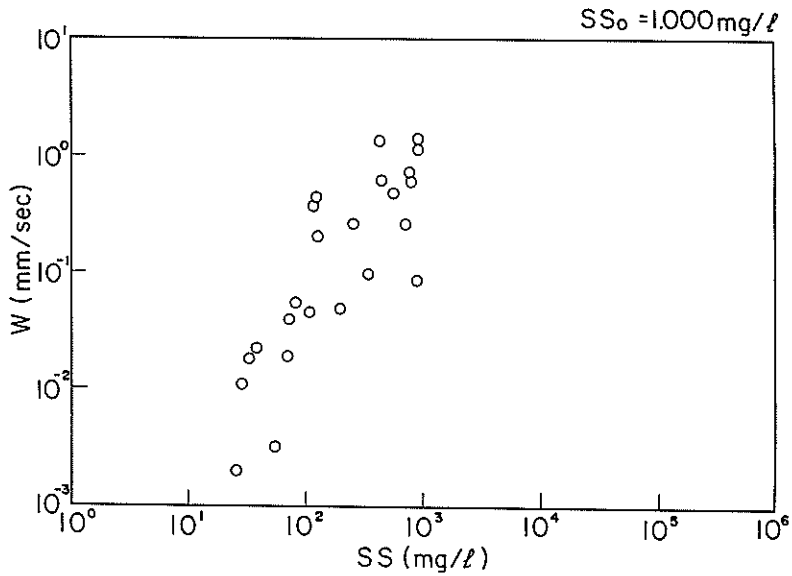


図 - A . 3 沈降速度と濃度の関係 (初期濃度 = 1,000)

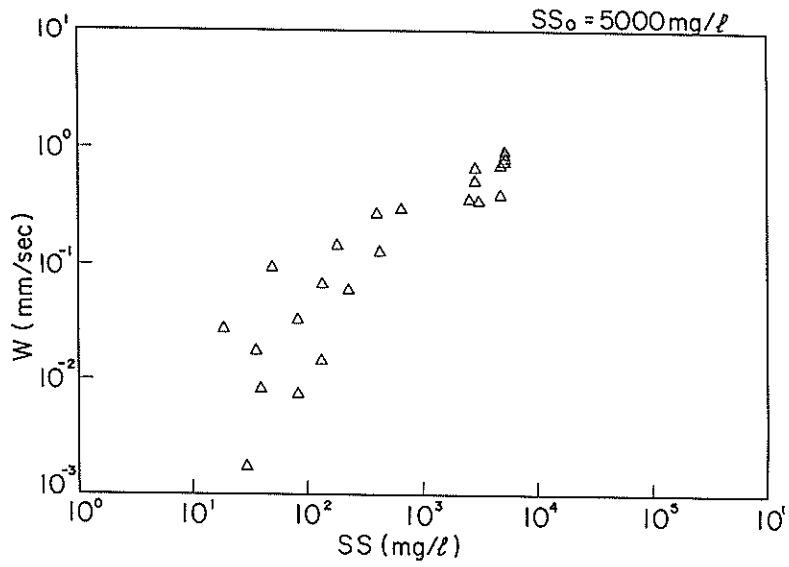


図 - A . 4 沈降速度と濃度の関係 (初期濃度 = 5,000)

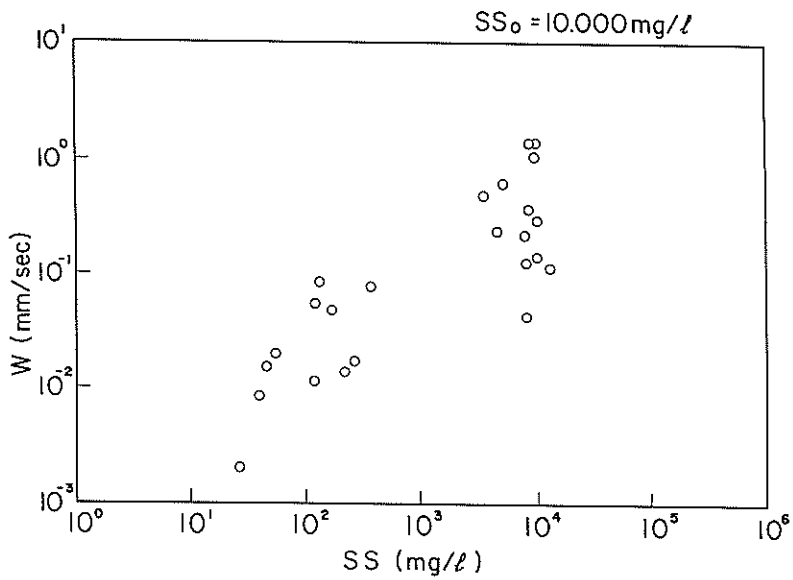


図 - A . 5 沈降速度と濃度の関係 (初期濃度 = 10,000)

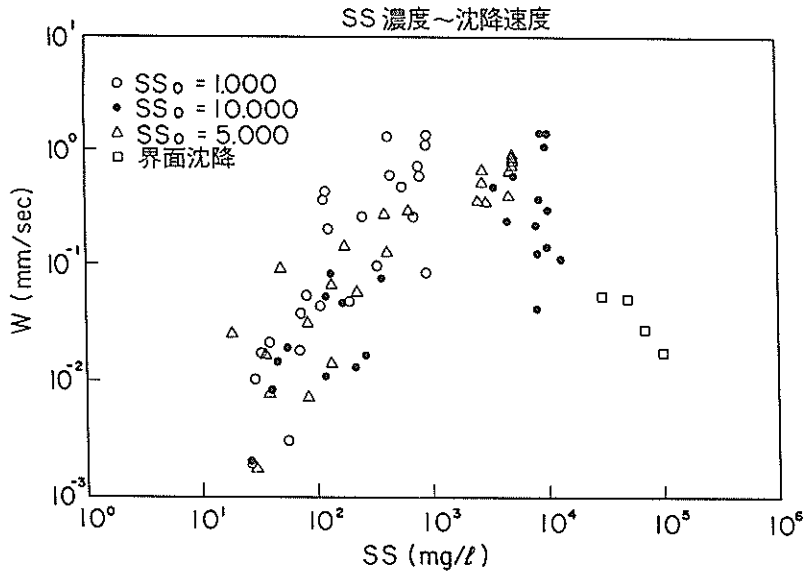


図 - A. 6 沈降速度と濃度の関係 (全試料)

より大きな粒子は D より深い点まで沈降しているの
 D 点には存在しない。一方、沈降速度が D/t より小
 さい粒子はまだ D 点まで沈降してきてないので、その濃度
 は初期状態と同じである。深さ D での濃度 C と初期濃度
 C_0 の比 C/C_0 を求めると、沈降速度がどの様な値を有
 しているものが含まれているかの指標となる。つまり、
 もし C/C_0 の値が 1 ならば、その時点での濃度が変化し
 ていないので、 D/t より大きい沈降速度の粒子は存在
 しないことになる。また、例えば C/C_0 の値が 0.8 であ
 ったとすると、20%濃度が変化したことになるので、
 D/t より沈降速度が大きい粒子が 20%存在する、す

なわち 80%は D/t より小さな沈降速度の粒子である
 ということになる。

したがって、縦軸にそれぞれの測定時刻および測定深
 さにおける C/C_0 をとり、横軸に沈降速度 $w = D/t$
 をプロットすれば、その沈降速度より小さな粒子の存在
 の割合を示す沈降速度加積曲線が求められる。

図 - A. 7 ~ 図 - A. 9 は、このようにして求められ
 た沈降速度の加積曲線を 3 種類の初期濃度に対して示し
 たものである。この図には、試料の粒度分布から Stokes
 の法則を用いて求めた沈降速度の加積曲線を破線で示し
 ている。粒度分布から求めた沈降速度は実際の沈降速度

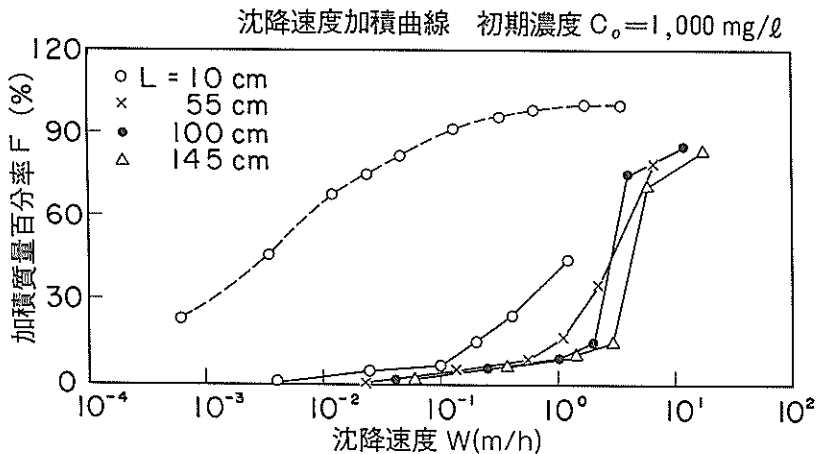


図 - A. 7 沈降速度加積曲線 (初期濃度 = 1,000)

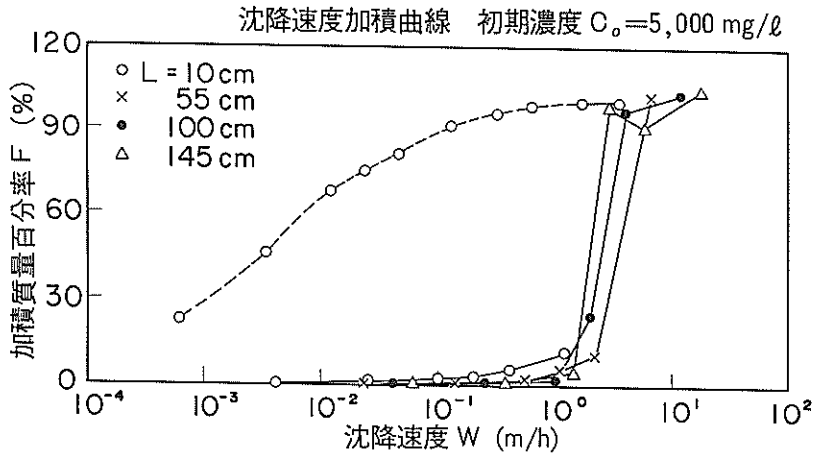


図 - A. 8 沈降速度加積曲線 (初期濃度 = 5,000)

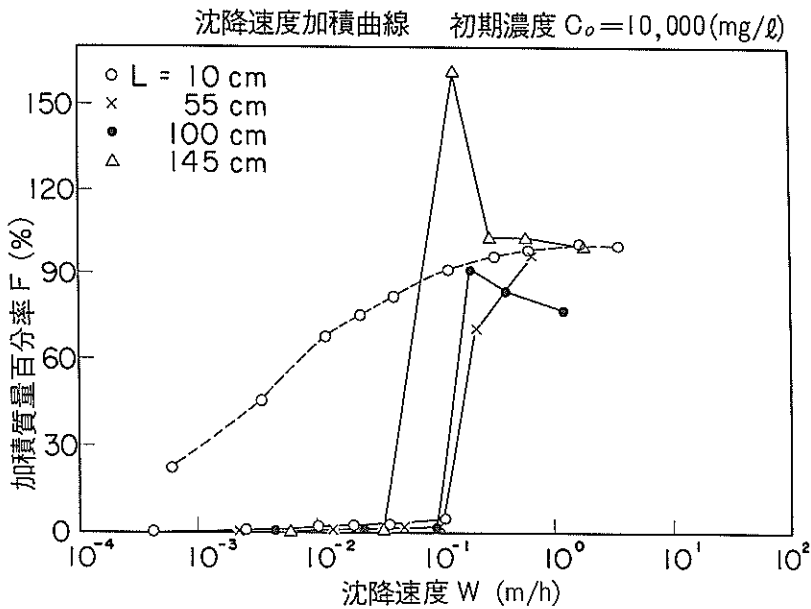


図 - A. 9 沈降速度加積曲線 (初期濃度 = 10,000)

に比較して小さく、フロックが形成されたことにより沈降速度が大きくなっていることが明確である。また、これらの図を比較するとわかるように、初期濃度の値、測定深度および測定時刻によって沈降速度加積曲線が大きく変化する。この原因としては、沈降速度加積曲線を求める際に、沈降速度が時間的にも空間的にも変化しないと仮定している点があげられる。実際の土粒子は沈降中にフロックを形成していくために沈降速度が大きく変化する。沈降速度加積曲線を求める際には、このような現

象を考慮していないために、ばらつきが大きくなったものと考えられる。

港湾技研資料 No. 680

1990・6

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 株式会社 東京プリント

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