

浸透圧密試験による粘土ブロックの力学性状に関する研究

(課題番号 13650550)

平成13年度～平成14年度科学研究費補助金（基盤研究（C）（2））

研究成果報告書

平成15年5月

研 究 代 表 者 赤 木 寛 一  
（早稲田大学・理工学部・教授）

## は し が き

建設汚泥は、1991年の「再生資源の利用促進に関する法律」の施行を機に再資源化・再利用が急速に促進されてきた。建設汚泥の再資源化・再利用の方法の第一段階は、脱水により含有水分の低下をはかることである。このために一般に行われているのは、各種の凝集剤を建設汚泥に添加して懸濁状態にある粘土などの細粒分粒子を凝集沈降させる方法である。このようにして沈降した粘土フロックは、粘土分、その懸濁液や凝集剤の性状により多様な性質を有する。

この種の軟弱な材料の力学的な性質を調べるのに地盤工学分野で一般に用いられるのは、圧密試験による方法である。圧密試験の方法には、従来の段階載荷型の方法以外にも、新たにJIS規格化された定ひずみ速度載荷による方法がある。しかしながら、これらの方法では、粘土フロックのような極めて軟弱な試料の特に低い有効応力下での力学的な特性を適切に求めることはできない。

そこで、当初凝集剤によって形成された建設汚泥フロックの力学性状調査に間隙水の浸透力を利用した浸透圧密試験を応用することをねらいとした。しかしながら、浸透圧密試験方法にはそれ自体の原理上、建設汚泥の再資源化・再利用の要求条件である2つの重要な効果がある。すなわち、1)間隙水の浸透力による汚泥脱水、2)間隙水の浸透に伴う汚泥含有有害物質の洗浄である。

以上の考察に基づいて、本研究では当初の目的をさらに実用化に向けて一歩進めて、東京近郊の中間処理場から採取した建設汚泥および廃棄物焼却処分場から採取した焼却飛灰を対象に、浸透圧密を利用した汚泥、焼却飛灰の脱水、洗浄効果を実験的に調査した。その結果をもとに、浸透力を利用した汚泥処理プラントの試設計を行った。

### 研 究 組 織

研究代表者： 赤 木 寛 一 (早稲田大学・理工学部・教授)

### 研 究 経 費

平成13年度	1,800	千円
平成14年度	1,000	千円
計	2,800	千円

## 研 究 発 表

### (1)学会誌等

H.Akagi, T.Ohwada, K.Kusunoki and H.Yamaguchi, : Dewatering a construction waste and effect of washing using hydraulic consolidation, Proc. 13th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Prague, August 2003( to be printed)

### (2)口頭発表

山口浩志, 赤木寛一, 大和田貴博, 楠謙吾：浸透圧密を利用した焼却飛灰の洗浄効果について, 土木学会第 58 回年次学術講演会, 土木学会, 2003 年 9 月(印刷中)

山口浩志, 赤木寛一, 大和田貴博, 楠謙吾：浸透圧密を利用した建設発生汚泥の脱水処理について, 第 38 回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, 2003 年 7 月 (印刷中)

大和田貴博, 仁田知宏, 伊藤正浩, 赤木寛一：浸透圧密を利用した建設汚泥の脱水処理について, 土木学会第 57 回年次学術講演会, pp,717～718, 土木学会, 2002 年 9 月

## 目次

はしがき	2
研究発表	3
目次	4
1 序論	6
1.1 はじめに	6
1.2 建設廃棄物の処理背景	7
1.3 浸透圧密試験	10
1.3.1 浸透圧密試験とは	
1.3.2 浸透圧密試験の理論	
1.4 既往の研究	16
1.4.1 浸透圧密試験	
1.4.2 浸透圧密を利用した脱水処理について	
2 浸透圧密を利用した脱水処理	18
2.1 実験目的	18
2.2 試料の基本的性状	19
2.2.1 粒度と密度	
2.2.2 コンシステンシー特性	
2.3 実験条件	22
2.3.1 試料	
2.3.2 圧力差	
2.3.3 比重	
2.3.4 投入量	
2.3.5 含水比と固相分濃度	
2.4 実験装置	24
2.4.1 圧密容器	
2.4.2 浸透圧载荷装置	
2.4.3 サンプリングライナー	
2.5 実験の準備と実験方法	27
2.5.1 圧密容器の組み立て	
2.5.2 载荷装置への据付	
2.5.3 供試体の作成	
2.5.4 実験方法	

2.6	実験結果	29
2.6.1	圧密量と時間の関係	
2.6.2	圧密終了時間	
2.6.3	脱水ケーキ	
2.7	考察	36
2.7.1	圧密時間	
2.7.2	相対含水比	
2.7.3	圧力差の及ぼす影響	
3	浸透圧密の洗浄効果	43
3.1	実験目的	43
3.2	試料の基本的性状	44
3.2.1	粒度と密度	
3.2.2	溶出試験結果	
3.3	実験方法	47
3.3.1	試料の調整	
3.3.2	浸透圧密	
3.3.3	試料の溶出試験	
3.3.4	廃液の分析	
3.3.5	ICP 分析	
3.4	実験結果	50
3.4.1	脱水ケーキの溶出試験結果	
3.4.2	廃液の分析結果	
3.5	考察	52
3.5.1	クロム	
3.5.2	鉛, 亜鉛	
4	浸透力を利用した建設汚泥処理方法の提案	55
4.1	供試体の剥離について	55
4.2	層厚と圧密時間について	57
4.3	試設計	58
5	結論	60
	参考文献	61

## 1 序論

### 1.1 はじめに

わが国では資源利用の約 50%を建設産業の建設資材として消費する一方で産業廃棄物最終処分量の 40%を超える量を建設廃棄物として最終処分している。生産および消費に伴って発生する産業廃棄物の処理は大都市圏を中心に問題となっているため、法体系の整備を始めとする様々な取り組みが進められている。他にも建設発生土の量も莫大であることから、これらを合わせた建設副産物についての総合的なリサイクル対策を推進している。この一連の建設リサイクル推進を受け、「将来的には建設工事に必要となる土砂は原則として工事間流用でまかなう」とした。このような大幅なリサイクル利用率向上のために主として次のような課題を指摘している。

- ①----- 技術基準の設定
- ②----- 利用技術の開発
- ③----- 発生および利用需要に関する情報交換システムの整備
- ④----- 土質改良プラントやストックヤードの整備
- ⑤----- これらの整備を前提とした利用調整体制の強化

これらの課題を受けて、連続地中壁工法や泥水シールド工法などで発生する高含水の建設汚泥を再利用するための脱水処理方法として、浸透圧密試験を行うことにする。

## 1.2 建設廃棄物の処理背景

### (1)「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律」の施行

現在の建設工事において、わが国は大量生産・大量消費・大量廃棄の形をとる中で、資源の利用から廃棄物の処理に至るまでの各段階で環境負荷が高まっており、特に近年、廃棄物の排出量が増大し、最終処分場の不足や不法投棄の多発など、さまざまな問題が深刻化している。このため、特に問題となっている建築解体廃棄物を中心に、土木系も含めた建設廃棄物全体のリサイクルを推進するための法制度が整備され、平成12年5月31日に建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律(略称：建設リサイクル法)が公布(平成14年5月末・施行)された。これにより、資源の分別解体や再利用化が義務づけられ、廃棄物排出量の抑制や廃棄物の適正な処理が行われ、よりいっそうの改善の促進が予想される。

### (2)建設副産物の現状とリサイクル

国土交通省において、全国の建設工事現場から搬出された建設副産物について、その総量・再利用の状況等の調査を行い、建設副産物実態調査結果としてとりまとめている。建設副産物は大きく分けて建設廃棄物、建設発生土に分けられる。そのなかで建設汚泥については産業廃棄物の汚泥であることから建設発生土に分類されておらず、建設廃棄物として取り扱われている。以下、個々の建設副産物の排出量と再資源化等量について示す。

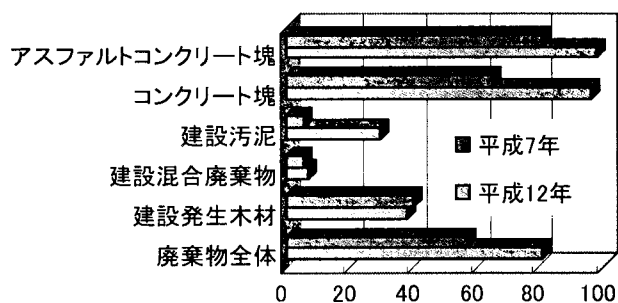


図 1.1 建設廃棄物の種類別再資源化率

#### a) 建設廃棄物

建設廃棄物の種類には、建設汚泥、アスファルト・コンクリート塊、コンクリート塊、建設混合廃棄物、建設発生木材等がある。建設廃棄物全体の状況は、公共工事や建築着工戸数等の減少により、排出量は9,900万トン(平成7年)から8,500万トン(平成12年度)となり、約15%減少している。また、再資源化等率は58%(平成7年度)から85%(平成12年度)に上昇していて、最終処分量は、4,100万トン(平成7年度)から1,300万トン(平成12年度)となり約70%減少している。

個々の排出量を見ると建設汚泥、アスファルト・コンクリート塊、コンクリート塊、建設混合廃棄物、建設発生木材で減少している。特にアスファルト・コンクリート塊とコンクリート塊の最終処分量はそれぞれ 98%、96%と大幅に減少している。しかし、建設汚泥は、リサイクルが進展しているものの、依然その再資源化等率は低位にとどまっている。また、建設混合廃棄物は、リサイクルが技術上困難な建設廃棄物であることもあり、そのほとんどが依然として最終処分されている。建設発生木材は、リサイクルが進展しておらず、ほぼ横ばいの状態になっている。詳しい再資源化率を図 1.1 に示す

#### b) 建設発生土

建設現場からの建設発生土の搬出量は、平成 7 年度では全国で年間約 4 億 4,600m<sup>3</sup>(約 8 億 600 万 t)と東京ドームの約 360 個分、関西国際空港の埋め立て量の約 2.5 倍に相当する膨大な量であったのに対し、平成 12 年度の建設発生土量は工事現場内での土砂の有効利用などにより平成 7 年度に比べ、36%減の 2 億 8,400 万 m<sup>3</sup>(約 5 億 5,000 万 t)となっている。

再利用状況としては建設発生土の搬出量のうち約 30%にあたる 8,500 万 m<sup>3</sup>が建設工事において再利用されている。この量は、建設工事での土砂利用量 15,600 万 m<sup>3</sup>の約 54%に相当する。

### (3)建設発生土の再利用のされ方について

建設発生土は、そのさい利用において第 1 種～第 4 種建設発生土として分類される。第 1 種では、主に砂、礫及びこれらに準ずるものをいい、第 2 種では砂質土、礫質土及びこれらに準ずるものをいう。また第 3 種では通常の施行性が確保される粘性土及びこれらに準ずるものとなっており、第 4 種は粘性土及びこれらに準ずるもの〔第三種建設発生土を除く〕をいう。また、この他に建設発生土の受入基準として物理性状、化学性状がありこれらの基準を満たさなければならない。以下に建設発生土の再利用化の実現場での利用のされ方や再利用にあたっての代表的な工法を示す。

#### a)種類別再利用法

##### ①第 1 種建設発生土

- ・ 工作物の埋め戻し材料
- ・ 土木構造物の裏込材
- ・ 道路盛土材料
- ・ 宅地造成用材料

##### ②第 2 種建設発生土

- ・ 土木構造物の裏込材
- ・ 道路盛土材料
- ・ 河川築堤材料



・宅地造成用材料

③第3種建設発生土

・土木構造物の裏込材

・道路路体用盛土材料

・河川築堤材料

・宅地造成用材料

・水面埋立用材料

④第4種建設発生土

・水面埋立用材料

b)再利用するための工法

①安定処理工法

②発泡ビーズ混合軽量土工法

③気泡混合土工法

④流動化処理土工法

⑤袋詰脱水処理工法

⑥短繊維混合補強土工法

⑦ジオテキスタイル補強土工法

⑧サンドイッチ工法(陸上埋立工法)

⑨サンドイッチ工法(水面埋立工法)

以上が主な改良工法である。

### 1.3 浸透圧密試験

#### 1.3.1 浸透圧密試験とは

浸透圧密試験は今井(1979)の「Development of a new consolidation test procedure using seepage force」により提案された。それは、浸透力を用いた新しい圧密試験法であり、現在でもそれは、今井の方法として一般的に用いられている。その後、浸透圧密試験担当小委員会(1988)により、特殊圧密試験に関するシンポジウムにおいて、試験方法(案)が確立された。現在までに、高田や今井らがさまざまな研究を行っている。

この試験方法は通常の試験方法の適用範囲外である泥水ともいえる浚渫埋立て粘土を対象とした圧密試験方法で、圧密圧力が $p=0.1\text{tf/m}^2$ 以下の低応力域の圧密特性を求めることが出来る。試験機の構成は図 1.2 の通りで円筒に入れた粘土上面に水圧を加え、粘土の自重と粘土中を下向きに流れる間隙水圧の浸透圧によって粘土を圧密する。また、この試験の解析方法には、今井の方法、FOXの方法などがあげられる。図 1.2 に浸透圧密試験機の図を示す。

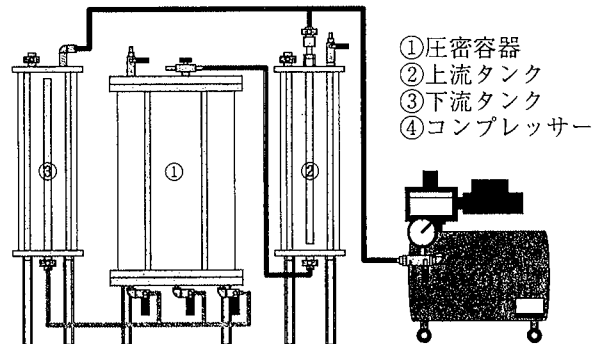


図 1.2 浸透圧密試験機

#### 1.3.2 浸透圧密試験の理論

##### (1)今井の方法

従来のオエドメーター試験においては、荷重は供試体の上面に段階的に作用される。従って圧密は表面荷重によって引き起こされる。一方、浸透圧密試験では浸透力によって供試体中のすべての要素が圧密される。したがって圧密は物体力により引き起こされる。

浸透力による圧密を支配するメカニズムを理解するために、どのように浸透力が有効応力に変換されるかを明らかにする必要がある。図 1.3 は供試体中の一つの要素の応力状態を示しており、ここでは下向きに定常浸透流が流れている。高さ  $z$  と  $z+dz$  との間の全応力の差は要素の全重量によってのみ生じるので次の式が得られる。

$$d\sigma = \gamma_1 dz \quad (1.1)$$

ここで、 $\gamma_1$ は要素の単位体積重量である。式(1.1)に有効応力の定義を適用することで、 $d\sigma'$ が以下のように得られる。

$$d\sigma' = \gamma_1 dz - du \quad (1.2)$$

ここで  $du$  は静水圧を含む水圧の変化である。一方、全水頭の変化は式(1.3)で示される。

$$dh = \frac{1}{\gamma_w}(du - \gamma_w dz) \quad (1.3)$$

式(1.2)と式(1.3)により、以下に示す基本式が得られる。

$$\frac{d\sigma'}{dz} = -\gamma_w \frac{dh}{dz} + \gamma' \quad (1.4)$$

ここで  $\gamma_w$  と  $\gamma'$  は水の単位体積重量と要素の水中単位体積重量である。

土質力学では浸透力は土の単位体積に対する力  $j$  として表される。ここで  $j$  は動水勾配  $i$  を使って、以下のように表される。

$$j = \gamma_w i \quad (1.5)$$

したがって式(1.4)は式(1.6)となる。

$$\frac{d\sigma'}{dz} = j + \gamma' \quad (1.6)$$

この式(1.6)は有効圧密応力の勾配は浸透力と土の水中単位体積重量によって引き起こされることを示している。言い換えれば浸透力と土の水中重量は式(1.6)により有効圧密応力に変換されるということである。

圧密完了後に浸透流の定常状態が達成されると、 $j$  と  $\gamma'$  は変化しなくなる。ここで供試体における  $z$  を供試体上面から下方に向かって計測することで式(1.4)もしくは式(1.6)の解が以下のように得られる。

$$\sigma'(z) = \gamma_w \{h_0 - h(z)\} + \int_0^z \gamma'(\eta) d\eta \quad (1.7)$$

ここで  $h_0$  は供試体上面の全水頭である。 $h(z)$  は図 1.3 にあるように  $h_0$  より小さく、また  $\gamma'$  は正であるので、 $\sigma'$  は  $z$  の増大につれて増大する。もちろん有効圧密圧力は上面では作用しないので  $z=0$  における  $\sigma'$  の値は 0 である。また、正規圧密状態の土の含水比は有効応力の増大につれて減少するので、供試体中の含水比  $z$  の増大につれて減少する。したがって供試体中の含水比分布と間隙水圧分布が計測されると、圧縮曲線および圧縮指数が供試体中における圧密圧力のすべての領域において決定される。

また、体積圧縮係数が圧縮曲線を使って決定される。間隙比  $e_0$  を持つ土要素が応力増分  $\Delta\sigma'$  によって圧密され、その結果  $\Delta e$  の間隙比減少が起こると、ひずみ増加は式(1.8)で表される。

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (1.8)$$

したがって、体積圧縮係数は式(1.2.9)として得られる。

$$m_v = \frac{1}{1 + e_0} \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'} \quad (1.9)$$

圧密係数を決定するために、透水係数が得られなければならない。圧密後の定常状態における流速  $v$  が計測されると、ダルシーの法則を用いて透水係数が得られる。

$$v = ki \quad (1.10)$$

$v$  は供試体中で一定であり、動水勾配  $i$  は間隙水圧分布によって計算されるので、 $k$  の値は有効圧密応力の関数として得られる。したがって圧密係数は式(1.10)と式(1.11)より決定され、定義より以下のように計算される。

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} \quad (1.11)$$

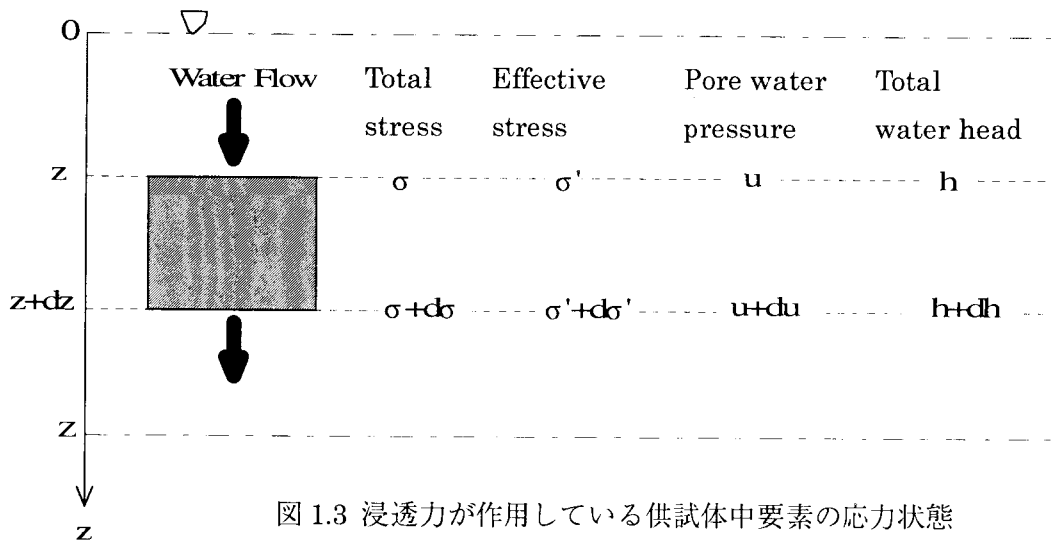


図 1.3 浸透力が作用している供試体中要素の応力状態

## 2) FOX の方法

FOX(1996)は実験室で計測された透水係数に対する動水勾配の影響についての理論モデルを発表した。鉛直方向の透水係数が供試体高さおよび境界応力条件の関数として、また圧縮性、透水係数が土の構成式としての式が得られた。この理論は圧縮性の物質を通る流れに基づいた、浸透力を利用した圧密を説明するものであるため、同様に浸透圧密試験に関してよい解釈を与える。この理論の適用においては、圧縮性に関する数式が制限されないようなやり方での修正が含まれている。

一様断面の飽和供試体を浸透圧密セルの中に入れる。鉛直応力および供試体境界における間隙水圧に関して、供試体上端では、鉛直全応力は  $\sigma_{vt}$ 、間隙水圧は  $u_t$  であり、鉛直有効

応力は  $\sigma_{vt}' = \sigma_{vt} - u_t$  である。供試体底面における対応する応力は  $\sigma_{vb}$ ,  $u_b$ ,  $\sigma_{vb}'$  である。側壁の摩擦力  $f$  は適用された全応力の反対鉛直方向に作用する。定常状態の供試体高さは  $L$ 、鉛直座標  $z$  の原点は供試体の底面である。泥水状の土およびその他の軟弱材料においては、側壁摩擦と自重は一般的に適用された応力に対して小さく、またしたがって  $\sigma_{vb}$ ,  $\sigma_{vt}$  の差も小さい。理論モデルにおいて、側壁摩擦と浮力を受けた土の自重は無視している。結果として、固体の比重  $G_s$  は 1 とみなされ、供試体底面における鉛直全応力は  $\sigma_{vb} = \sigma_{vt} + L\gamma_w$  となる。ここで  $\gamma_w$  は水の単位体積重量(一定)である。また、透水係数  $k_v$  の対数と鉛直有効応力  $\sigma_v'$  の対数は線形関係にあると仮定される。それゆえに以下の式が導かれる。

$$k_v = k_{v0} \left( \frac{\sigma_v'}{\sigma_{v0}'} \right)^{-A} \quad (1.12)$$

ここで  $A = -d \log k_v / d \log \sigma_v'$ ;  $k_{v0}$  = 任意の点での応力  $\sigma_{v0}'$  に対応する鉛直方向透水係数である。一定の圧縮指数  $C_c$  および透水係数変化指数  $C_k$  を持つ土においては、パラメーター  $A$  は比  $C_c/C_k$  と等しい。この研究においては、 $C_c$  も  $C_k$  も一定と想定する必要はない。実際に多くのデータは低有効応力領域ではどのパラメーターも一定であるとは想定し得ないということを示している。それゆえ浸透圧密試験の解釈においては、Fox(1996)によって与えられていた  $C_c/C_k$  を使う方法よりむしろ、ここに示されている  $A$  を使う方法の方がよい。

この仮定に基づくと、供試体内の任意の点  $z$  における動水勾配は以下になる。

$$\frac{dh}{dz} = -\frac{v}{k_{v0}} \left[ \frac{\sigma_{vt} + \gamma_w(L-h)}{\sigma_{v0}'} \right] \quad (1.13)$$

ここで  $h$  ( $z=0$  を除く) 任意の点  $z$  における全水頭;  $v$  = 定常状態の流速である。正の  $v$  は正の  $z$  方向における上方向の流れに対応する。一般的なケースである  $A \neq 1$  の場合は式(1.13)の解は以下になる。

$$\frac{k_{v0}(\sigma_{v0}')^A}{v\gamma_w(1-A)} [\sigma_{vt} + \gamma_w(L-h)]^{1-A} = z + C \quad (1.14)$$

ここで  $C$  = 積分定数である。供試体の上端および下端における境界条件を用いると以下になる。

$$z = L, \quad h = L + \frac{u_t}{\gamma_w}; \quad z = 0, \quad h = \frac{u_b}{\gamma_w} \quad (1.15), (1.16)$$

式(1.14)は以下のような定常状態における全水頭分布に関する非線型式になる。

$$h = L + \frac{\sigma_{vt}}{\gamma_w} - \frac{1}{\gamma_w} \left[ \frac{L-z}{L} (\sigma_{vb}')^{1-A} + \frac{z}{L} (\sigma_{vt}')^{1-A} \right]^{1/(1-A)} \quad (1.17)$$

任意の位置  $z$  においては、 $h$  は  $A$ 、供試体高さ  $L$ 、および上端、下端の境界応力条件 ( $\sigma_{vt}$ ,  $u_t$ ,  $u_b$ ) の関数である。

式(1.17)より，関連する他のすべての式が計算される． $z$ における間隙水圧は

$$u = \gamma_w(h-z) \quad (1.18)$$

式(1.17)を式(1.18)に代入すると，間隙水圧に関する式が得られる．

$$u = \sigma_{vt} + \gamma_w(L-Z) - \left[ \frac{L-Z}{L}(\sigma'_{vb})^{1-A} + \frac{Z}{L}(\sigma'_{vt})^{1-A} \right] \quad (1.19)$$

同様に，鉛直有効応力も以下になる．

$$\sigma'_v = \left[ \frac{L-Z}{L}(\sigma'_{vb})^{1-A} + \frac{Z}{L}(\sigma'_{vt})^{1-A} \right] \quad (1.20)$$

また定常状態における流速は以下になる．

$$v = \frac{-k_{vo}(\sigma'_{vo})^A}{L\gamma_w(1-A)} \left[ (\sigma'_{vb})^{1-A} - (\sigma'_{vt})^{1-A} \right] \quad (1.21)$$

式(1.17)と式(1.19)～(1.21)は  $A \neq 1$  の時に適用できる． $A=1$  という特別な場合には次のような対応する式が導かれる．(Fox 1996)

$$h = L + \frac{\sigma_{vt}}{\gamma_w} - \frac{1}{\gamma_w} \left[ (\sigma'_{vt})^{z/L} (\sigma'_{vb})^{L-z/L} \right] \quad (1.22)$$

$$u = \sigma_{vt} + \gamma_w(L-z) - (\sigma'_{vt})^{z/L} (\sigma'_{vb})^{L-z/L} \quad (1.23)$$

$$\sigma'_v = (\sigma'_{vt})^{z/L} (\sigma'_{vb})^{L-z/L}, \quad v = \frac{-k_{vo}\sigma'_{vo}}{L\gamma_w} \ln \left( \frac{\sigma'_{vb}}{\sigma'_{vt}} \right) \quad (1.24), (1.25)$$

$A=1$  というケースは一般的には実際に必要とされない数値解析における特殊な状態を表している．したがって，この論文の残りにおける式の展開は， $A \neq 1$  という仮定のもと進めていくこととする．

上記した分析的な式は定常状態にある供試体内の流れと応力条件を表している．以下に述べる仮定はこれらの式の解を得るのに必要となる．：(1)圧縮と流れは 1次元である．(2)鉛直有効応力の対数と透水係数の対数の間には 1つに対して 1つの線形な関係が存在する．(3)側壁摩擦力と土の自重の合力の全応力分布に与える影響は小さい．

最初の仮定は供試体側面からの水漏れの無い均質な土供試体による浸透圧密試験において満足される．供試体側面からの水漏れは，供試体内の中心部分の流れとその周囲の流れを分割する二重リング底盤を用いることで解消される．(Daniel 1994)

2つめの仮定に関して，多くの研究結果から  $A$  は有効応力のいくつかの  $\log$  サイクルにわたってほぼ一定であるということが示されており，更に，1次近似として以下に表す回帰式によって表される狭い範囲内にあるとされている．

$$k_v \text{ (m/s)} = 3.68 \times 10^{-8} (\sigma'_{vt} \text{ kPa})^{-0.78} \quad (1.26)$$

A(=一定な構成モデル)はまた浸透圧密, 有限ひずみ圧密における解析的および数学的な研究においても適用されてきた。(Huerta et al. 1988; Townsend and Mc Vay 1990)したがって, 先の調査による結果は, 線形  $\log k_v - \log \sigma'_v$  関係は満足のいく近似を多くのスラリーに関して与えるということを示す。これらは, 線形  $\log k_v - \log \sigma'_v$  モデルが高圧縮性土の低有効応力領域において良い近似を示すということを表している。

3つめの仮定に関しては, Been と Sills(1981), Tan et al(1988)は, 側壁摩擦は粘土スラリーの自重圧密試験における全応力分布に対してほとんど影響を与えないということを示した。また側壁摩擦の影響はさらに, 供試体の高さ一直径比の減少, 圧密容器壁面へのグリースの塗布, テフロン加工壁面の使用によって低減される。(Leonalds and Girault 1961) 土の自重はまた解を得るために無視しなければならない。実験室の供試体においては, この仮定と関連づけられる誤差は, 適用された応力および供試体内で起こる相対的に大きな間隙水圧の変化と比較すると一般的に小さい。(Znidarcic et al 1986; Fox 1996) 一方, 高含水比材料の圧密沈下の現場予測において, 自重は一般的に無視できない。このような予測においては, 浮力を受ける固体の重量を説明する有限ひずみ圧密モデルが必要となる。(Gibson et al. 1981 ; Fox and Berles, 1997)

## 1.4 既往の研究

### 1.4.1 浸透圧密試験

浸透圧密試験における研究は、前述のとおり今井(1979)により提案され現在に至るまで今井、高田らなどにより様々な研究がおこなわれている。

高田(1993)らは、超軟弱地盤に対する圧密試験方法の比較に関して、重力場の自重圧密、遠心力場の自重圧密、浸透圧密、供試体断面積を大きくした通常の段階載荷圧密を行って相互関係を調べている。そして、100g の遠心力場、浸透圧密、通常の段階載荷の試験では  $w_0 = 150\%$  程度の「低含水比」の場合はほぼ連続した試験結果が得られたが、更に高含水比になると遠心力の圧密で、粗粒分離の影響が現れたとしている。

また、高田(1994)らは、圧密中の供試体の形状変化と浸透水量の変化、間隙水圧測定針の太さと形状について、マニュアル案では、圧密供試体高さ 6 cm 程度に対し、最小直径を 12cm と提案しているが、供試体が剥離するので、供試体直径 15cm は必要ではないだろうか、間隙水圧測定針も細いほうが良いが、測定系の体積変化との兼ね合いがあり、今回に限って言えば 2 cm で充分であった、測定時間は、供試体上方で短くても良くまた連続測定による自動化も考える余地があると提案している。

更に、高田(1995)らは、以前の研究で問題となっていた周面剥離の影響で、中心部の一次元圧密状態が保証されているか疑わしい事について調べている。そして、圧密後の層厚が 6 cm 程度の場合供試体外周から 4cm までは、周面剥離後は一次元圧密状態が崩れていて、通常用いられている直径 12cm の供試体は、中心部の一次元圧密状態が疑わしい、更に、間隙水圧の連続測定においては試料により測定針の上昇速度を決める必要があるとしている。

これらの研究をふまえ高田(1999)らは、浸透圧密試験法の改良を行っている。それによると、一次元圧密領域に関して、マニュアルで規定している最小径 12cm の供試体の中心部は、一次元圧密状態を維持している、間隙水圧の測定は、測定の自動化と測定時間の短縮化、測定針を細く(直径 2 mm)した連続測定方式を取る、としているが、供試体の縦割れという問題点も指摘している。

また、今井(1999)は多層沈降堆積粘土における浸透圧密試験を行い、単層供試体のみならず、多層供試体でも行える、更に多層沈降堆積供試体において生じる間隙比のばらつきは実測結果を補正した補正曲線を用いることによって実測結果から得られたものとはほぼ同一の  $\log f\text{-}\log \sigma'$  関係が得られこの補正曲線を用いた  $\log f\text{-}\log \sigma'$  関係を利用すれば、 $c_v \cdot m_v$  などの圧密係数を定めることができる、また各層内の分級の影響は明確に現れているとしている。基本的性状の異なる研究に関して、茨木(1998)らは、建設汚泥のブロック形状に応じた脱水性の違いを調査し、ブロックサイズが小さいほど低圧密圧力領域で大きな圧縮性を示し、ブロック大では低圧密圧力領域における圧縮性非常に小さいことが明らかになったとしている。また、鶴長(1999)らは建設汚泥の pH が圧密に及ぼす影響について、pH を下げること



で圧縮性が改善でき、建設汚泥は、1-10kPa において高い圧縮性を示すとしている。また、茨木(1998)は浸透圧密試験結果と定ひずみ速度圧密試験結果は圧密圧力 1-10 kPa の範囲でよく一致しており、Fox の理論による浸透圧密試験の解析法の妥当性が認められたとしている。

#### 1.4.2 浸透圧密を利用した脱水処理について

浸透圧密試験を利用した脱水処理の研究は従来、デハイドラムと呼ばれる重力式脱水装置の性能を評価するためにおこなわれてきた。デハイドラム内の応力領域はフィルタープレスなどの加圧脱水機と比較して非常に低応力の状態であることから、低応力領域における圧密脱水特性の調査を目的としていたが、伊藤ら(2001)は浸透圧密試験そのものを新しい脱水処理法と位置付けることを提案しその可能性について研究をおこなった、

浸透圧密試験の理論と解析方法については今井(1979)によって提案されている。以来、今井および高田によりその試験法の改良が進められてきた。今井は圧密終了後にピックアップの供試体中への挿入を伴う間隙水圧測定をおこない、これをパラメーターとして浸透圧密試験の解析をおこなってきた。しかし、この間隙水圧の測定はその困難さと測定による供試体の乱れの影響が指摘されていた。一方、FOX(1997)はこの問題点である間隙水圧測定を省略した浸透圧密試験方法を提案していた。そこで、茨木ら(2000)は今井の方法と FOX の方法の試験結果を比較し二つの解析方法の整合性を調べた。その結果、二つの解析法における整合性が認められた。これをうけ伊藤ら(2001)は、ピックアップによる間隙水圧測定を必要としない FOX の方法を利用した建設汚泥の浸透圧密試験を実施し、応力領域を変化させた場合における建設汚泥の脱水性能の評価をおこなった。その結果、供試体の底面に近いほど脱水効果が促進され、同じ高さ割合における含水比は圧力差が大きくなるほど低くなる結果が得られた。また、試料の違いにより試験終了後の含水比が異なることがわかった。脱水性能としても表 1.1 に示すように一般的に建設汚泥の脱水に使用されているフィルタープレスと比べても脱水後のケーキ含水比に近い値が得られ、低応力であっても効果的な脱水ができることがわかった。

これらをうけ、本年度の研究では、圧密試験における最適圧力差の検討をおこなうとともに試料のコンシステンシーや細粒分含有率の違いによる脱水性能の違いについて調べる。また、実験中にみられる供試体の剥離の現象についても検討していく。

表 1.1 脱水機の種類と脱水ケーキの性質

脱水機種類	加圧力 (kPa)	脱水ケーキ含水比 (%)	
フィルタープレス(低圧)	500~700kPa	$(0.8\sim0.9)*\omega_L$	
フィルタープレス(高圧)	4000kPa	$(0.6\sim0.8)*\omega_L$	
ベルトプレス	100~150kPa	$1*\omega_L$	
浸透圧密	40kPa	建設汚泥	case1 0.92* $\omega_L$
		$\omega_L =$	case2 0.85* $\omega_L$
		131.1	case3 0.96* $\omega_L$

## 2 浸透圧密を利用した脱水処理

### 2.1 実験目的

本試験では流動状を呈する高含水比の細粒土である建設汚泥に対して、円筒形容器内で軸方向に上方から下方へ圧力水を浸透させることにより試料を圧密させる浸透圧密試験を実施し、圧密終了後の試料の含水比分布を求めることでその脱水性能を評価することを目的としている。なお、圧力水についてはその載荷圧力(圧力差)変化させ、また建設汚泥試料については、カオリン粘土、海成粘土を加えることにより建設汚泥の細粒分含有率、コンシステンシーを変化させ、比較検討した。

## 2.2 試料の基本的性状

浸透圧密試験を行うにあたり，本章ではプラントに各建設現場から搬入された建設汚泥，カオリン粘土，海成粘土の基本的性状について調査した。

### 2.2.1 粒度と密度

建設発生汚泥，カオリン粘土，海成粘土の粒度試験結果，密度試験結果をそれぞれ表 2.1，表 2.2，表 2.3 に示す。また粒径加積曲線を図 2.1 に示す。

表2.1 建設発生土の粒度試験と密度試験結果

	粒径 mm	通過質量百分率%	試験日	9月12日
	ふるい分析	26.5	100.00	粗れき分%
19		100.00	中れき分%	0.00
9.5		100.00	細れき分%	0.00
4.75		100.00	粗砂分%	2.69
2		100.00	細砂分%	65.58
0.85		99.80	シルト分%	25.24
0.425		97.31	粘土分%	6.50
0.250		84.85	2mmふるい通過質量百分率%	100.00
0.106		45.22	0.425mmふるい通過質量百分率%	97.31
0.075		31.74	0.075mmふるい通過質量百分率%	31.74
沈降分析	0.052	25.68	最大粒径 mm	2.00
	0.038	21.54	60%粒径 $D_{60}$ mm	0.15
	0.024	17.40	50%粒径 $D_{50}$ mm	0.12
	0.014	10.63	30%粒径 $D_{30}$ mm	0.06
	0.010	9.39	10%粒径 $D_{10}$ mm	0.01
	0.007	7.46	均等係数 $U_C$	13.18
	0.004	5.80	曲率係数 $U'_C$	2.41
	0.002	3.59	土粒子の密度 $\rho_s$ $g/cm^2$	2.69

表2.2 カオリン粘土の粒度試験と密度試験結果

	粒径 mm	通過質量百分率%	試験日	10月23日
	ふるい分析	26.5	100.00	粗れき分%
19		100.00	中れき分%	0.00
9.5		100.00	細れき分%	0.00
4.75		100.00	粗砂分%	0.00
2		100.00	細砂分%	0.00
0.85		100.00	シルト分%	42.20
0.425		100.00	粘土分%	57.8
0.250		100.00	2mmふるい通過質量百分率%	100.00
0.106		100.00	0.425mmふるい通過質量百分率%	100.00
0.075		100.00	0.075mmふるい通過質量百分率%	77.98
沈降分析	0.046	95.89	最大粒径 mm	0.075
	0.033	93.40	60%粒径 $D_{60}$ mm	0.0055
	0.021	92.16	50%粒径 $D_{50}$ mm	0.0043
	0.012	82.72	30%粒径 $D_{30}$ mm	0.0022
	0.009	78.99	10%粒径 $D_{10}$ mm	0.00046
	0.007	66.08	均等係数 $U_C$	7.24
	0.004	43.22	曲率係数 $U'_C$	1.16
	0.002	21.35	土粒子の密度 $\rho_s$ g/cm <sup>2</sup>	2.62

表2.3 海成粘土の粒度試験と密度試験結果

	粒径 mm	通過質量百分率%	試験日	10月23日
	ふるい分析	26.5	100.00	粗れき分%
19		100.00	中れき分%	0.00
9.5		100.00	細れき分%	0.00
4.75		100.00	粗砂分%	1.86
2		100.00	細砂分%	20.15
0.85		99.71	シルト分%	56.48
0.425		98.14	粘土分%	21.5
0.250		92.02	2mmふるい通過質量百分率%	100.00
0.106		79.98	0.425mmふるい通過質量百分率%	100.00
0.075		77.98	0.075mmふるい通過質量百分率%	77.98
沈降分析	0.049	60.61	最大粒径 mm	2
	0.035	58.67	60%粒径 $D_{60}$ mm	0.039
	0.023	53.07	50%粒径 $D_{50}$ mm	0.022
	0.014	37.24	30%粒径 $D_{30}$ mm	0.007
	0.010	36.76	10%粒径 $D_{10}$ mm	0.002
	0.007	30.67	均等係数 $U_C$	16.81
	0.004	15.09	曲率係数 $U'_C$	0.61
	0.002	9.01	土粒子の密度 $\rho_s$ g/cm <sup>2</sup>	2.71

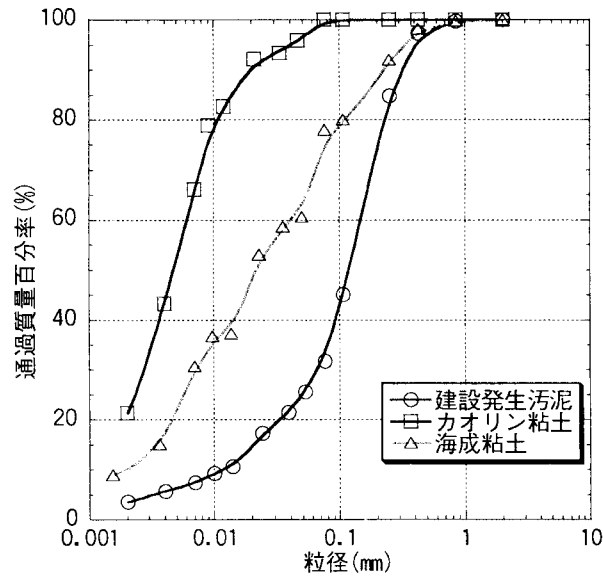


図2.1 試料の粒径加積曲線

### 2.2.2 コンシステンシー特性

浸透圧密試験に使用する建設発生汚泥，カオリン粘土，海成粘土にたいして，液性限界および塑性限界試験を行う．液性限界を測定する方法として，キャサグランデ法(J S F T 141-1990)が主に用いられている．しかし，この方法では今回使用するような建設発生汚泥のような低塑性の粘土に対しては，精度が低い事が知られている．そこで今回は低塑性の粘土でも高い精度の得られるフォールコーン試験を採用した．なおコーンは直径 2.3 (c m), 質量 60.0 (g), 先端角 60 度のものを使用し，陶器製で内径 9.0 (c m) の半球形状の試料容器を用い，多点法によりコーンが 10 (m m) 貫入の時の含水比をファイネスナンバーとしこれが液性限界に対応するとした．

液性限界および塑性限界試験結果を表 2.4 に示す．

表2.4 液性限界および塑性限界試験結果

試料	F %	w <sub>p</sub> %	I <sub>p</sub>
建設汚泥	29.40	24.90	4.50
カオリン粘土	40.80	17.59	23.21
海成粘土	71.00	49.00	22.00

## 2.3 実験条件

### 2.3.1 試料

今回使用する試料は、建設発生汚泥、カオリン粘土、海成粘土、また建設発生汚泥にカオリン粘土、海成粘土をそれぞれ質量比で 50(%), 100(%), 150(%)の割合で混ぜ合わせたものを使用する。

それぞれの試料のファイネスナンバー(液性限界), 塑性限界, 塑性指数を表 2.5 に示す。

表2.5 試料のコンシステンシー

試料	F %	w <sub>p</sub> %	I <sub>p</sub>
建設発生汚泥	29.40	24.90	4.50
海成粘土	71.00	49.00	22.00
汚泥+カオリン粘土50%	30.35	23.86	6.49
汚泥+カオリン粘土100%	30.80	24.22	6.58
汚泥+カオリン粘土150%	32.20	24.23	7.97
汚泥+海成粘土50%	40.40	26.28	14.12
汚泥+海成粘土100%	48.70	31.39	17.31
汚泥+海成粘土150%	55.25	33.39	21.86

### 2.3.2 圧力差

バックプレッシャーとして下流タンク側には空気圧 100(kPa)をかけ, 上流タンク側の空気圧は 140(kPa), 160(kPa), 200(kPa)の 3 種類に変化させた。

### 2.3.3 比重

試験開始時の圧密試料の比重は, 実プラント内でのポンプ圧送を考慮し 1.2 とした。

### 2.3.4 投入量

高田らによると浸透圧密試験において, 浸透圧密試験機が内径 20(c m)の場合, 圧密終了時の試料の層厚が約 6(c m)になるように試料の投入量を決定することを提案している。そこで今回の実験は圧密終了時の試料の層厚が約 6(c m)となるように投入量を決定した。圧密試料の投入量を表 2.6 に示す。

表2.6 圧密試料の投入量

試料	投入量m <sub>s</sub> kg
建設発生汚泥	3.96
海生粘土	1.53
汚泥+カオリン粘土50%	2.22
汚泥+カオリン粘土100%	2.22
汚泥+カオリン粘土150%	2.22
汚泥+海成粘土50%	2.03
汚泥+海成粘土100%	1.87
汚泥+海成粘土150%	1.76

### 2. 3. 5 含水比と固相分濃度

表 2. 6 に示した圧密試料の投入量と投入時の比重 1.2 より、含水比および固相分濃度を決定した。

なお固相分濃度は以下の式により求めた。

$$s = \frac{100}{\frac{w}{100} + 1} \quad (2.1)$$

ここに、s：固相分濃度(%), w:汚泥の含水比(%)。

圧密試料投入時の含水比および固相分濃度を表 2.7 に示す。

表2.7 圧密試料の含水比と固相分濃度

試料	含水比w%	投入量m <sub>s</sub> kg
建設発生汚泥	276.12	26.59
海生粘土	278.60	26.41
汚泥+カオリン粘土50%	274.41	26.71
汚泥+カオリン粘土100%	273.56	26.77
汚泥+カオリン粘土150%	273.04	26.81
汚泥+海成粘土50%	276.95	26.53
汚泥+海成粘土100%	277.36	26.50
汚泥+海成粘土150%	277.61	26.48

## 2.4 実験装置

この章では実験装置図の概略図を図 2.2 に示し、また各部分について解説する。

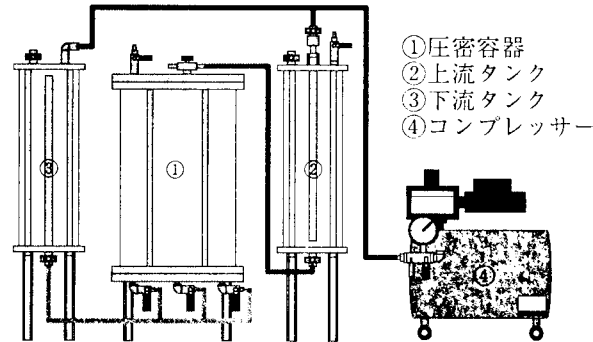


図 2.2 浸透圧密試験機

### 2.4.1 圧密容器(図 2.2 の①)

#### (1)透明円筒固定具透明円筒

内径 20.0 c m 高さ 34.0 c m

#### (2)底版

透明円筒を支持し、供試体を通過する水がパールコンを通して外へ排出できるもので、排水は供試体中央部分と外周部分に区分される構造である。上部固定リング板と鋼製ロックよりなり、底版に連結し圧密容器を固定する。概略図を図 2.3 に示す。

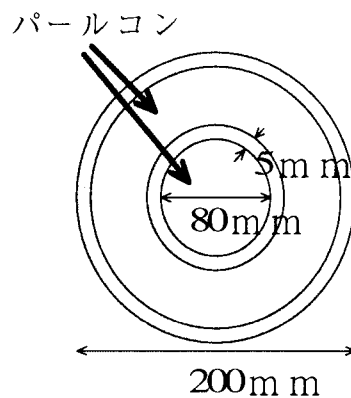


図 2.3 圧密容器の底版の概略図

#### (3)加圧板

水が流れるように小孔を空けてあり、図 2.4 ような質量 932.4(g) で三層構造の分割式載荷



板を使用した。

加圧板を用いる理由は以下のことが挙げられる。

- ①圧密沈降過程において供試体上端に水圧を均等に裁載できる
- ②Side wall leakage と呼ばれる側壁からの水漏れを防ぐことができる
- ③供試体上部にも有効応力を加えることにより供試体の壁面剥離をある程度ふせぐことができる。

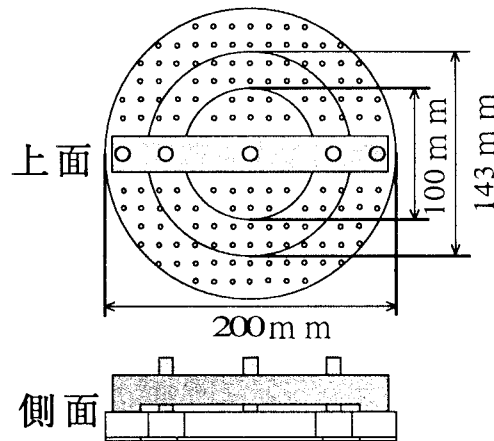


図 2.4 載荷板の概略図

#### (4)上蓋

圧密容器を密閉し上部固定リング板に密着固定できるものであり、圧力水注入口、空気抜きバルブを備えたものを使用した。

### 2.4.2 浸透圧載荷装置

#### (1)コンプレッサー(図 2.2 の④)

アネスト岩田株式会社製 OFP-04C を使用し AC100V, 容量 25( l ), 能力 1.03(Mpa)である。

#### (2) 水圧載荷タンク(図 2.2 の②, ③)

上流タンク(図 2.2 の②)と下流タンク(図 2.2 の③)から構成され、載荷水圧はコンプレッサーから送られた空気圧をレギュレーターで調圧し、水圧に置換させて圧密容器内に伝え、上蓋に高圧そして底版に低圧を加える差圧式定水頭載荷方式になっている。

### 2.4.3 サンプルングライナー

図 2. 5 に示すような内径 35(mm), 高さ 120(mm)の金属製の円筒形状のサンプルングライナーを使用した。

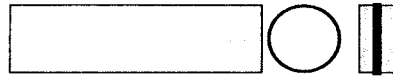


図 2. 5 サンプルングライナー

## 2.5 実験の準備と実験方法

### 2.5.1 圧密容器の組み立て

- (1) ポーラスストーンと同型のろ紙をポーラスストーンに載せる。
- (2) 底版に圧密容器を圧密固定用具で緊結する。次に実験に使用する水を容器内に若干注入して底版のバルブを開放し、ヘッド差で容器内にある余分な水を排水させた後で底版バルブに所定の管を連結する。

### 2.5.2 裁荷装置への据付

- (1) 上蓋に所定の管を連結させ、圧密容器内に水をみたして上蓋を取り付ける。
- (2) 上流タンクにコンプレッサーにより加圧し、差圧を利用して水を流す。
- (3) 経路内の空気を下流タンク、圧密容器に付属する空気抜きにより除去する。

### 2.5.3 供試体の作成

- (1) 採取試料を良くかき混ぜる。
- (2) 所定の質量を圧密容器内に入れる。
- (3) 2時間静置する。
- (4) 供試体上部にろ紙をのせ加圧版を載荷し、水で上部を満たした後上蓋を取り付ける。

### 2.5.4 実験方法

- (1) コンプレッサーを用いて上流側タンクの空気圧  $P_u$  および下流側タンクの空気圧  $P_b$  を所定のバックプレッシャーに相当する空気圧に設定する。
- (2) 上流側タンクの空気圧を  $P_{u1}$  に上げる。
- (3) (2)で作用させた圧力差により圧密を開始する。
- (4) 所定の時間間隔で圧密供試体の層厚を測定する。
- (5) 層厚が一定となったところで圧密を終了する。
- (6) 両タンクの空気圧を0にし、圧密容器の上蓋を取り外して供試体上部の水を排出する。
- (7) サンプリグライナーを供試体中央部に垂直に差し込み、サンプリグライナーの外側の供試体を取り除き、乱さないように内部の試料を採取する。
- (8) ライナー下部のピストンを押し上げ、ライナー上部より押し出される供試体をスライスし含水比を測定する。

**(注意事項)**

(1) 含水比測定分布について

供試体をスライスする際には、ライナー上部にノギスをあてがい、所定のスライス間隔にしたがって供試体を押し出していく。

## 2.6 実験結果

### 2.6.1 圧密量と時間の関係

実験条件に示したそれぞれの試料，それぞれの圧力差における圧密量と時間の関係を図2.6～図2.13に示す。

#### (1)建設発生汚泥

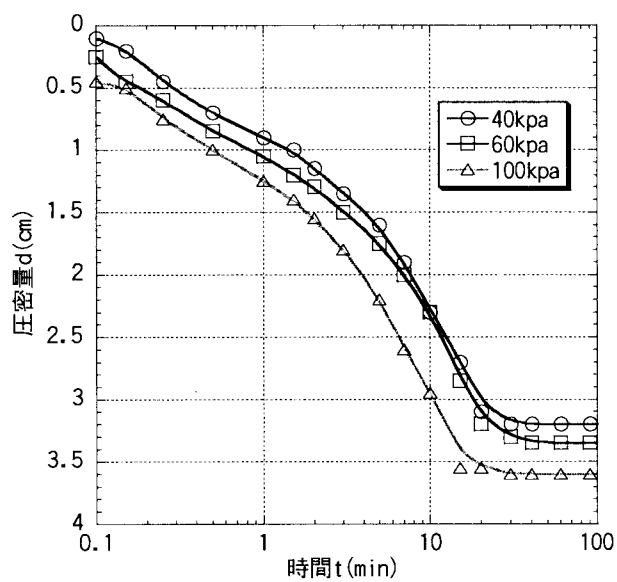


図2.6 建設発生汚泥の圧密量と時間の関係

(2)海成粘土

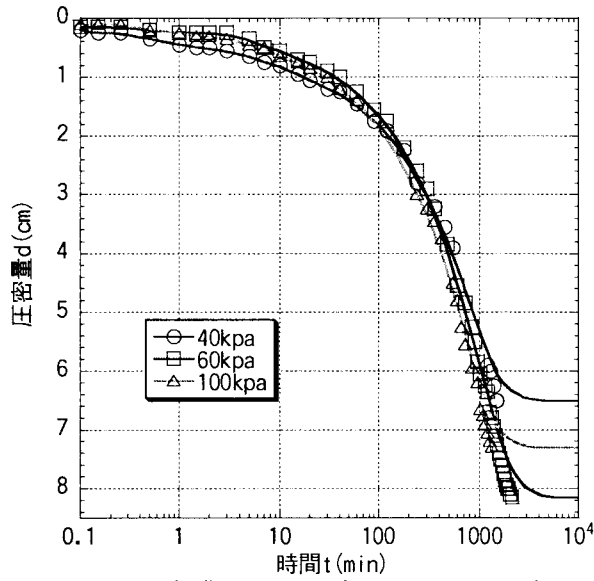


図2.7 海成粘土の圧密量と時間の関係

(3)汚泥+カオリン粘土 50%

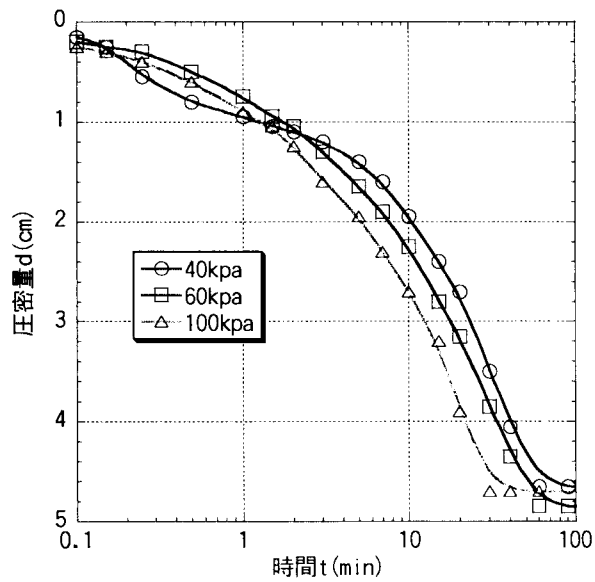


図2.8 汚泥+カオリン粘土50%の圧密量と時間の関係

(4)汚泥+カオリン 100%

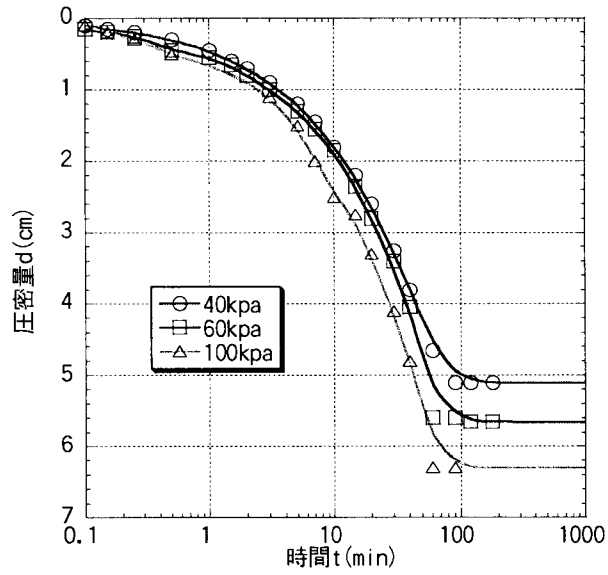


図2.9 汚泥+カオリン粘土100%の圧密量と時間の関係

(5)汚泥+カオリン 150%

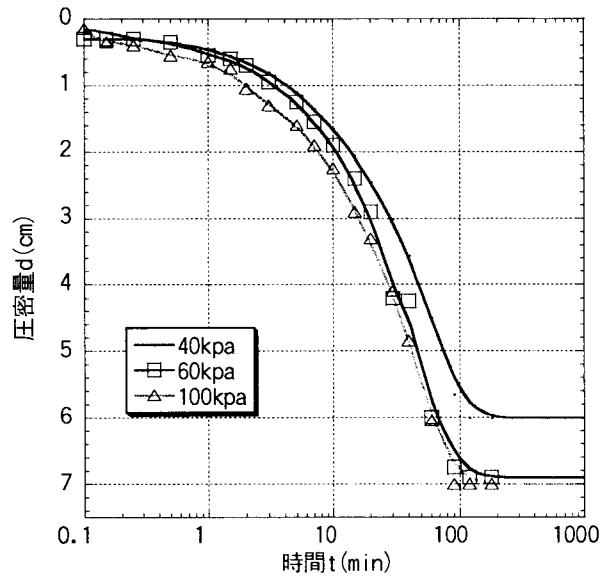


図2.10 汚泥+カオリンナイト150%の圧密量と時間の関係

(6) 汚泥+海成粘土 50%

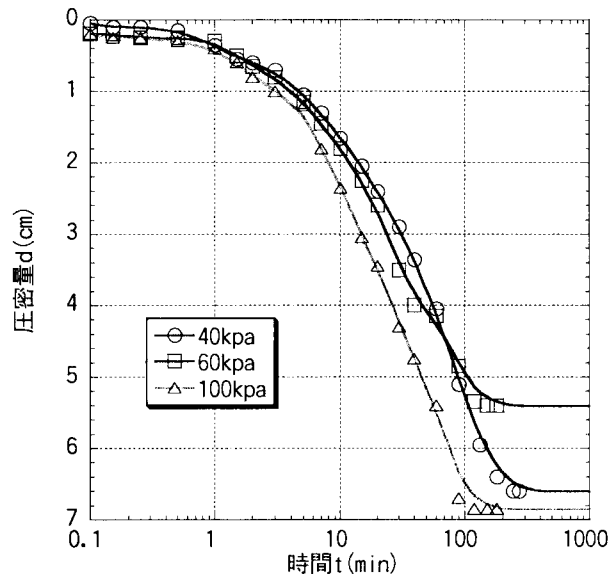


図2.11 汚泥+海成粘土50%の圧密量と時間の関係

(7) 汚泥+海成粘土 100%

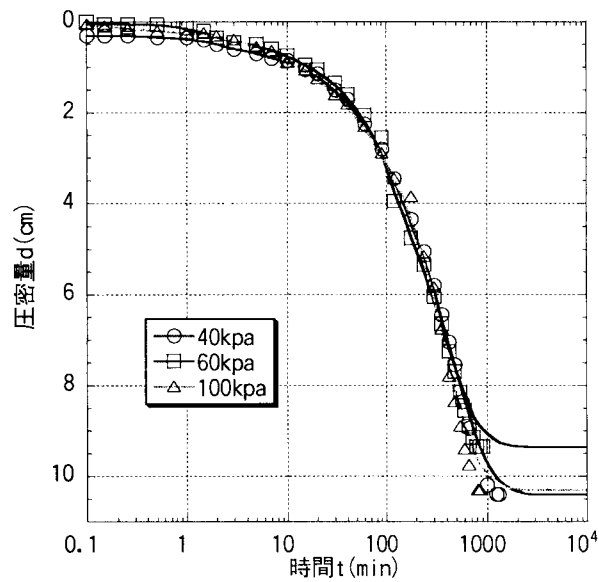


図2.12 汚泥+海成粘土100%の圧密量と時間の関係



(8)汚泥+海成粘土 150%

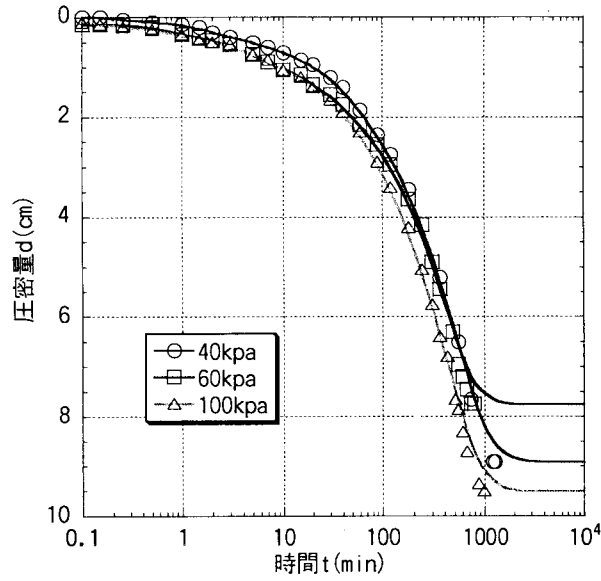


図2.13 汚泥+海成粘土150%の圧密量と時間の関係

2.6.2 圧密終了時間

図 2.6～図 2.13 を用いて 3 t 法を用いて、圧密終了時間を求めた。各実験条件における圧密終了時間を表 2.8 に示す。

表2.8 圧密終了時間

試料	F %	圧力差 kPa	圧密時間 min
建設発生汚泥	29.40	40	60
		60	52
		100	39
海生粘土	71.00	40	4300
		60	5600
		100	3450
汚泥+カオリン粘土50%	30.35	40	180
		60	132
		100	90
汚泥+カオリン粘土100%	30.80	40	215
		60	155
		100	139
汚泥+カオリン粘土150%	32.20	40	355
		60	265
		100	260
汚泥+海成粘土50%	40.40	40	355
		60	225
		100	275
汚泥+海成粘土100%	48.70	40	2600
		60	2500
		100	2000
汚泥+海成粘土150%	55.25	40	2600
		60	1840
		100	2250

### 2.6.3 脱水ケーキ

#### (1)形状

脱水ケーキの形状を図 2. 14 に示す。

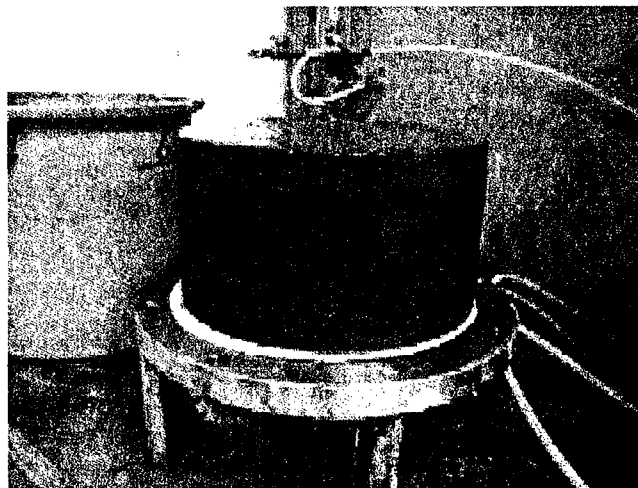


図 2.14 脱水ケーキの形状

## (2)含水比

各実験条件における圧密終了後の脱水ケーキの含水比を表2.9に示す。なお圧密供試体上部は水の取り除きの具合でサンプリング時の試料の含水比が大きく異なるため、層厚の半分より下の部分の平均含水比を脱水ケーキの含水比とした。

表2.9 脱水ケーキの含水比

試料	圧力差	脱水ケーキの含水比
	kPa	%
建設発生汚泥	40	38.65
	60	36.25
	100	37.85
海生粘土	40	103.01
	60	80.19
	100	81.51
汚泥+カオリン粘土50%	40	38.18
	60	35.98
	100	32.96
汚泥+カオリン粘土100%	40	40.15
	60	36.88
	100	38.15
汚泥+カオリン粘土150%	40	38.35
	60	37.51
	100	37.15
汚泥+海成粘土50%	40	48.52
	60	42.83
	100	44.24
汚泥+海成粘土100%	40	64.17
	60	65
	100	58.34
汚泥+海成粘土150%	40	76.36
	60	72.41
	100	62.8

## 2.7 考察

### 2.7.1 圧密時間

表 2. 8 よりファイネスナンバーと圧密時間の関係を図 2. 15 に示す.

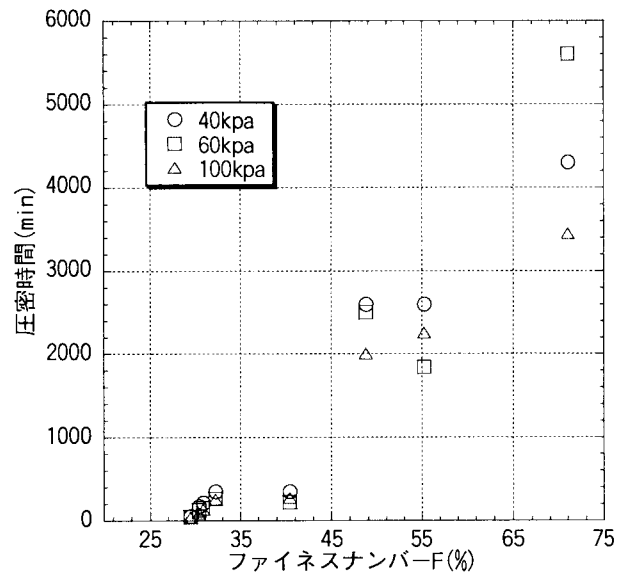


図2.15 ファイネスナンバーと圧密時間の関係

図 2.15 より、ファイネスナンバーが大きくなれば圧密により時間を要することがわかる。

つづいてファイネスナンバーが一定で細粒分含有率の異なる試料の圧密時間について考えてみる。建設発生汚泥、建設発生汚泥にカオリン粘土を質量比で 50(%), 100(%), 150(%) で混ぜ合わせた試料は表 2.5 よりファイネスナンバーがほぼ一定となっている。したがってこの 4 個の試料はファイネスナンバーが一定で細粒分含有率の異なる試料ということになる。この 4 個の試料の細粒分含有率を表 2.1～表 2.3 から求め表 2.10 に示し圧密時間と細粒分含有率との関係を図 2.16 に示す。

表2.10 ファイネスナンバーが同じ試料の細粒分含有率

圧密試料	細粒分含有率 %
建設発生汚泥	31.74
汚泥+カオリンナイト50%	54.49
汚泥+カオリンナイト100%	65.87
汚泥+カオリンナイト150%	72.7

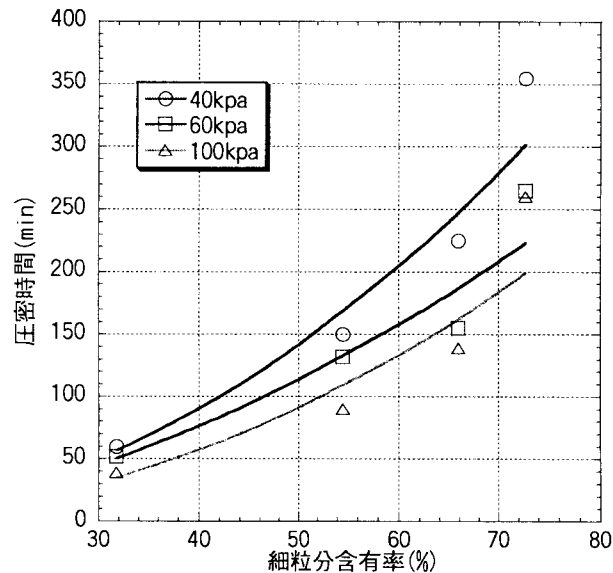


図2.16 ファイネスナンバーが同じ試料の  
圧密時間と細粒分の関係

図 2. 16 に示す曲線は実験データを累乗近似したものである。近似式を式(2.2)～式(2.3)に示す。

$$40kPa: Y = 0.0539X^{2.01} \quad R = 0.967 \quad \text{式(2.2)}$$

$$60kPa: Y = 0.1040X^{1.79} \quad R = 0.943 \quad \text{式(2.3)}$$

$$100kPa: Y = 0.0278X^{2.07} \quad R = 0.929 \quad \text{式(2.4)}$$

ここに、 $Y$ :圧密時間(min),  $X$ :細粒分含有率(%),  $R$ :相関係数。

式(2.2)～式(2.4)より圧密時間は細粒分含有率の二乗にほぼ正比例していることがわかる。このことにより以下のことが考えられる。

浸透圧密において、圧密試料の微小要素が一般の圧密理論に従うと仮定すれば、次式が成り立つ。

$$t = \frac{T_v \cdot H^2}{C_v} \quad \text{式(2.5)}$$

ここに、 $t$ :圧密時間(sec),  $C_v$ :圧密係数( $\text{cm}^2/\text{sec}$ ),  $T_v$ :時間係数,  $H$ :最大排水長さ(cm)。

$$C_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} \quad \text{式(2.6)}$$

ここに、 $k$ :微小要素の透水係数( $\text{cm}/\text{sec}$ ),  $\gamma_w$ :水の単位体積重量( $\text{kgf}/\text{cm}^3$ ),  $m_v$ :体積圧縮係数( $\text{cm}^2/\text{kgf}$ )。

また、Hazen の式は次式で与えられる。

$$k = C \cdot D_{10}^2 \quad \text{式(2.7)}$$

ここに、 $C$ :比例定数( $1/\text{cm} \cdot \text{s}$ ),  $D_{10}$ :有効径(cm)。

Hazen の式が成り立つと仮定すれば、式(2.6)は以下のようなになる。

$$C_v = \frac{C \cdot D_{10}^2}{m_v \cdot \gamma_w} \quad \text{式(2.8)}$$

式(3.8)より式(3.5)は以下のようなになる。

$$t = \frac{m_v \cdot \gamma_w \cdot T_v \cdot H^2}{C} \left( \frac{1}{D_{10}^2} \right) \quad \text{式(2.9)}$$

式(2.9)より圧密時間は有効径の二乗に反比例することがわかる。以上のことを考えれば細粒分含有率が増加するということは有効径が小さくなるということであるので、有効径の二乗に反比例する圧密時間は細粒分含有率の二乗に正比例するといえる。

## 2.7.2 相対含水比

ファイネスナンバーと脱水ケーキの含水比を表 2.11 に示し、その関係を図 2.17 に示す。

表2.11 ファイネスナンバーと脱水ケーキの含水比

試料	圧力差 kPa	F %	脱水ケーキ の含水比 %
建設発生汚泥	40	29.40	38.65
	60		36.25
	100		37.85
海生粘土	40	71.00	103.01
	60		80.19
	100		81.51
汚泥+カオリン粘土50%	40	30.35	38.18
	60		35.98
	100		32.96
汚泥+カオリン粘土100%	40	30.80	40.15
	60		36.88
	100		38.15
汚泥+カオリン粘土150%	40	32.20	38.35
	60		37.51
	100		37.15
汚泥+海成粘土50%	40	40.40	48.52
	60		42.83
	100		44.24
汚泥+海成粘土100%	40	48.70	64.17
	60		65
	100		58.34
汚泥+海成粘土150%	40	55.25	76.36
	60		72.41
	100		62.8

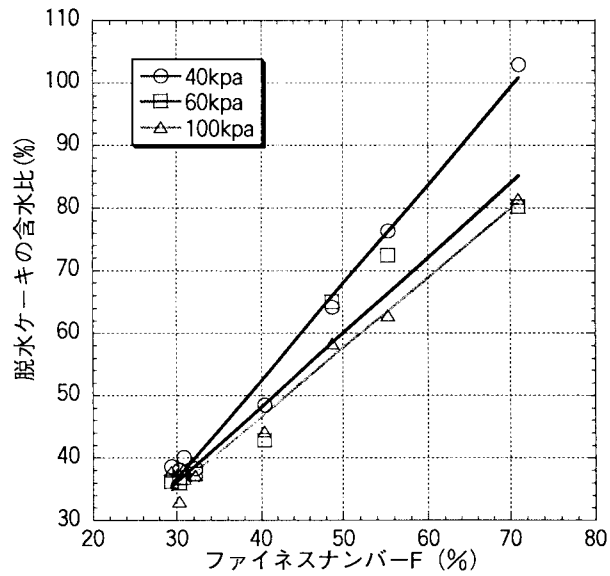


図2.17 ファイネスナンバーと脱水ケーキの含水比との関係

図 2.17 を見ると、脱水ケーキの含水比は圧力差によらずファイネスナンバーとほぼ正比例の関係にあるといえる。したがって脱水ケーキの含水比は、圧密試料のコンシステンシーの影響を受けているといえる。

次に相対含水比を式(2.10)で定義し、相対含水比とファイネスナンバーの関係を図 2. 18 に示す。

$$W_r = \frac{w}{F} \quad (2. 10)$$

ここに、F:ファイネスナンバー(%), w:脱水ケーキの含水比(%).

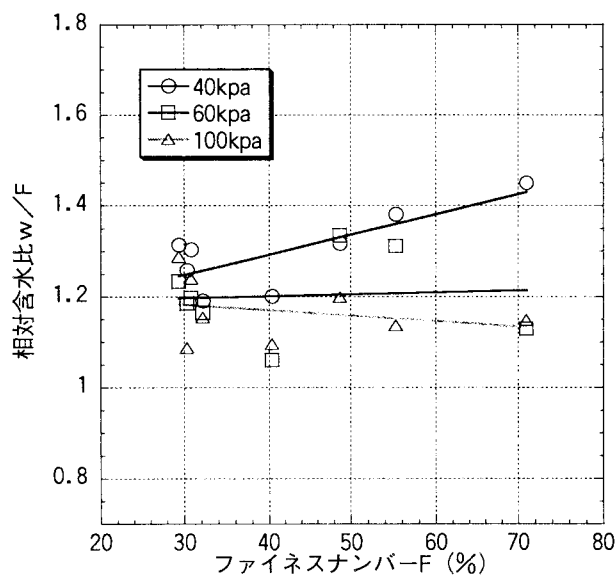


図2.18 相対含水比とファイネスナンバーの関係

図 2.16 より，同じ圧力差であれば相対含水比はファイネスナンバーによらず一定であるといえる．すなわち相対含水比はファイネスナンバーの影響を受けないといえる．したがって脱水性の指標として相対含水比を用いれば，ファイネスナンバーの異なる試料を同じように評価できるといえる．

### 2. 7. 3 圧力差の及ぼす影響

#### (1)相対含水比に与える影響

相対含水比と圧力差の関係を図 2.19 に示す

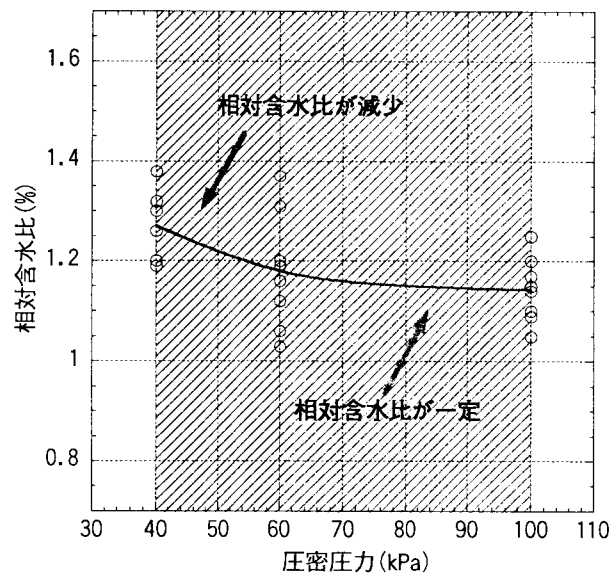


図2.19 圧密圧力と相対含水比の関係

図 2.19 より今回用いた試料では圧力差 60(kPa)で脱水した脱水ケーキのほうが圧力差 40(kPa)で脱水した脱水ケーキより，ほとんどの試料で相対含水比が低くなるという傾向が出ている．また圧力差 60(kPa)で脱水した脱水ケーキと圧力差 100(kPa)で脱水した脱水ケーキの相対含水比はほぼ一定となっているという傾向も出ている．したがって今回の試料においては圧力差を増加させればどこまでも相対含水比が下がっていくわけではないことがわかる．よって今回使用した試料のようなコンシステンシー，粒径の土に対しては圧力差は 60(kPa)で十分であるという結果が得られた．

#### (2)圧密時間に及ぼす影響

圧密時間と圧力差の関係を図 2. 20，図 2. 21 に示す．



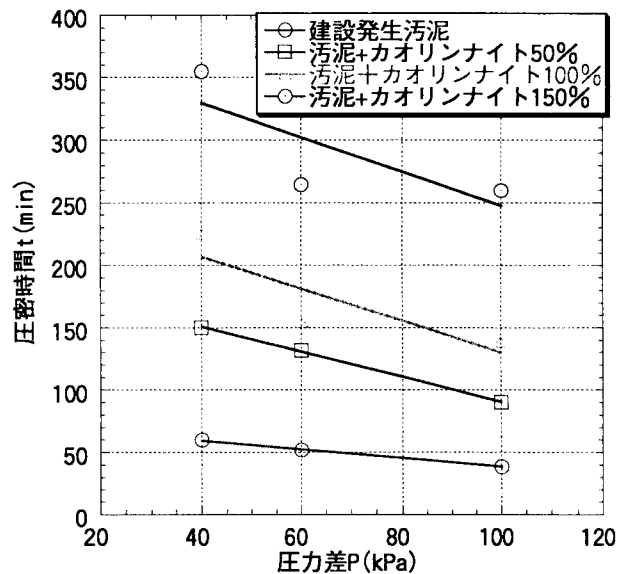


図2.20 圧密時間と圧力差の関係①

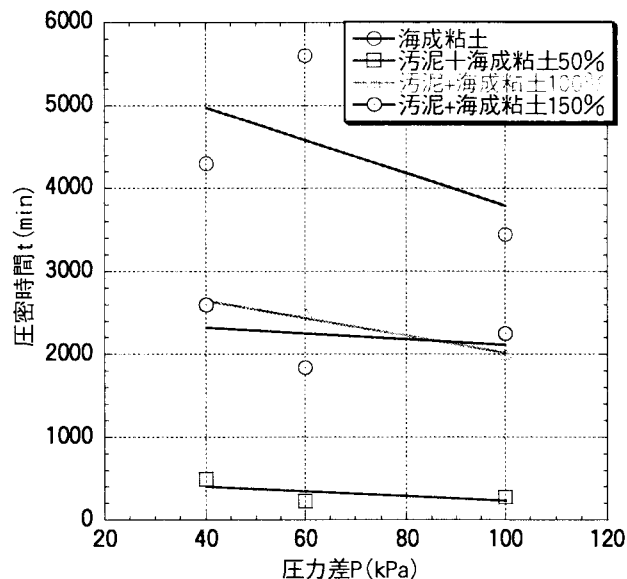


図2.21 圧密時間と圧力差の関係②

図 2.20, 図 2.21 より圧力差が大きくなれば圧密試料によらず圧密時間を短縮できることがわかる。またファイネスナンバーが大きければ大きいほど圧密に時間を要している。このことは圧密試料に凝集剤等を混入することにより、改善する必要がある。

建設発生汚泥に海成粘土を質量比で 100%, 150%それぞれ混入した圧密試料では後者の方がファイネスナンバーが大きいかかわらず、圧密時間が前者に比べて短縮されている。この理由として 2 つのことが考えられる。まず実験条件として試料を圧密容器に投入して静置時間を 2 時間としていたのだが、2 時間だけでは試料が完全に沈降せず圧力差をか

けると直ちに圧密が開始されていない可能性が考えられる。もうひとつの理由として次のことが考えられる。実験条件として圧密終了時の圧密試料の層厚が約 6(cm)となるように圧密試料の投入量を決定したことが考えられる。図 2.22 に示すように圧密試料の投入量は建設発生汚泥に対する海成粘土の質量比が低いものほど圧密終了時の脱水ケーキの含水比がひくいため、投入量は多くなり、土粒子の沈降速度は建設発生汚泥に対する海成粘土の質量比が低いものほど試料の粒径が大きくなるため、速くなる。その結果建設発生汚泥に質量比で 100%海成粘土を混入した圧密試料が浸透圧密開始時の試料の層厚が最も大きくな

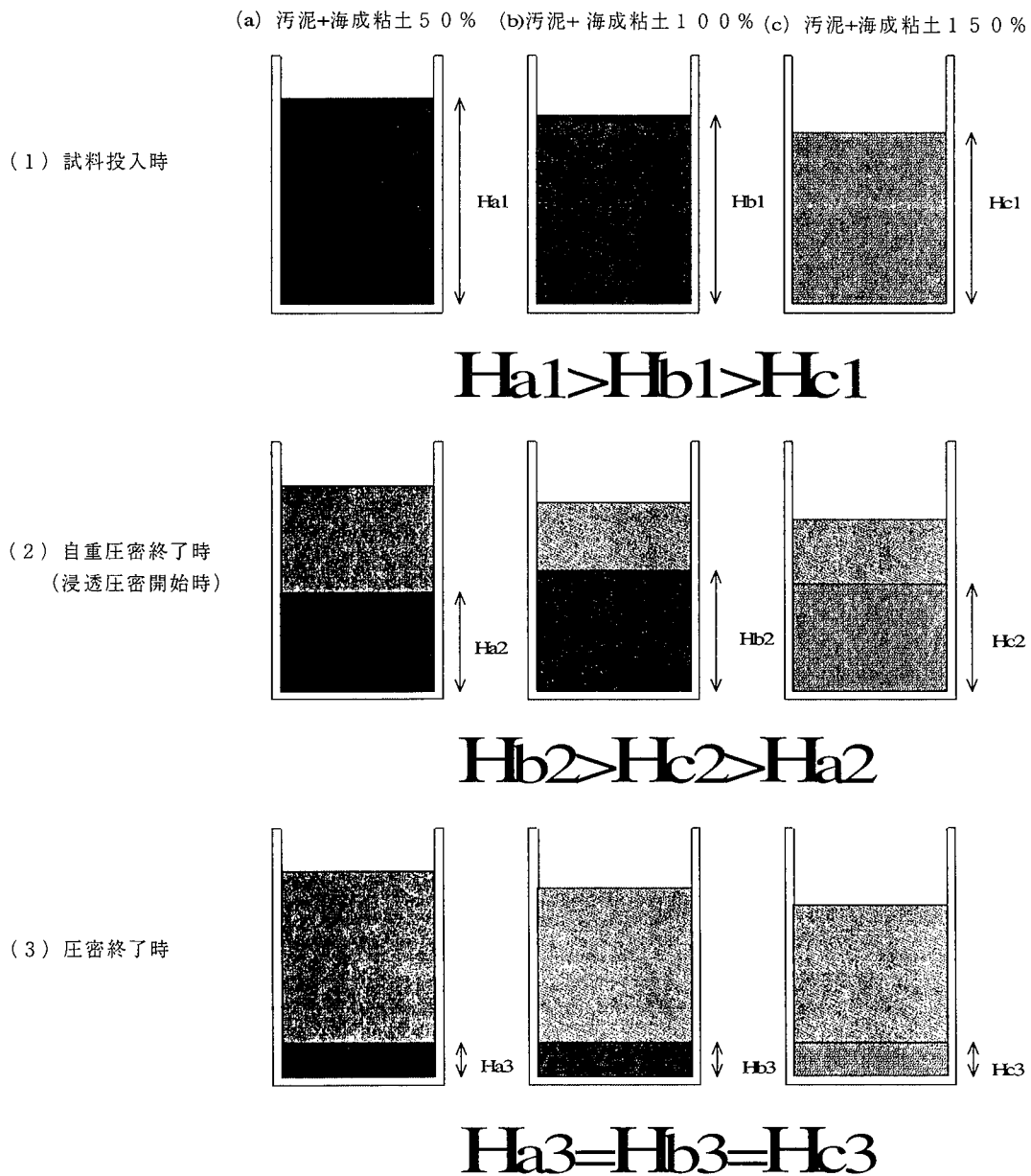


図 2.22 圧密時間説明図

り圧密時間が最もかかってしまったと思われる。

### 3 浸透圧密の洗浄効果

#### 3.1 実験目的

一般廃棄物の焼却処理に伴い発生する焼却飛灰や石炭火力発電所から排出される石炭灰は、主にその再利用化においてコンクリートの骨材、路盤材、セメント原料や土壌改良材として、また固化安定かによりタイル、ブロックとして有効利用されている。しかし、これら排出された焼却灰の大半は埋立処分に頼っているのが現状であり、最終処分場の残余年数を考慮すると焼却灰の再利用化の向上は急務といえる。焼却灰を効果的に再利用化できない要因として焼却灰中に含まれている鉛、クロムを始めとする重金属の存在が挙げられる。重金属は、体内に堆積することにより人体に悪影響を及ぼす物質であり、焼却灰が適切に処理されないと灰中に含まれている重金属が溶出し土壌などに蓄積され地下水汚染など様々な弊害が生じる恐れがある。

焼却灰の浄化についての研究は、近年の環境問題の関心が高まり報告数が増加している。これらのうちフラッシング法とよばれている水による洗浄は最も効果的な手法として考えられ、欧米では商業ベースで開発が進んでいるものである。瀬戸井(2000)らは、石炭火力発電所から発生する焼却飛灰である石炭灰を用い洗浄効果の実験をおこなった。実験では、温水を使うことにより重金属イオンの熱拡散運動を促進することまた、炭酸ガスを併用することでpH値を変化させ石炭灰中に存在する重金属イオンを遊離しやすい環境を創ることを目的とし洗浄効果の可能性を示した。そして、伊藤ら(2001)は浸透圧密試験において試験終了後、低圧側の廃液タンクにおいて排液に懸濁が見られたことから浸透圧密試験において何らかの洗浄効果の可能性を示唆した。

これらをうけ、本実験では産業廃棄物焼却場から発生した飛灰について浸透圧密の理論がその浸透力によって供試体の間隙水を減少させ脱水させること。そして、大部分の供試体の間隙水が浸透水と置換することから、焼却飛灰中に含まれている重金属について試験前後の脱水ケーキ、排水中の重金属濃度を溶出試験により調べることにより、その洗浄効果を確認し浸透圧密試験の有効性を示すことを目的とした。

### 3.2 試料の基本的性状

浸透圧密による洗浄効果を調べるにあたり、本項では産業廃棄物焼却場から採取した焼却飛灰の基本的性状について調査した。

#### 3.2.1 粒度と密度

焼却飛灰の粒度試験結果、密度試験結果を表 3.1 に示す。また粒径加積曲線を図 3.1 に示す。

表3.1 焼却飛灰の粒度試験結果

ふるい分析		沈降分析	
粒径 mm	通過質量百分率%		
26.5	100.00	pH	12.77
19	100.00	粗れき分%	0.00
9.5	100.00	中れき分%	0.00
4.75	100.00	細れき分%	0.00
2	100.00	粗砂分%	0.00
0.85	100.00	細砂分%	5.66
0.425	100.00	シルト分%	82.5
0.250	99.63	粘土分%	11.84
0.106	96.94	2mmふるい通過質量百分率%	100.00
0.075	94.34	0.425mmふるい通過質量百分率%	100.00
0.052	93.09	0.075mmふるい通過質量百分率%	94.34
0.038	88.31	最大粒径 mm	0.425
0.024	79.44	60%粒径 $D_{60}$ mm	0.019
0.014	39.38	50%粒径 $D_{50}$ mm	0.016
0.010	12.75	30%粒径 $D_{30}$ mm	0.012
0.007	11.84	10%粒径 $D_{10}$ mm	0.002
0.004	11.84	均等係数 $U_C$	9.50
0.002	11.38	曲率係数 $U'_C$	3.79
		土粒子の密度 $\rho_s$ g/cm <sup>2</sup>	2.84

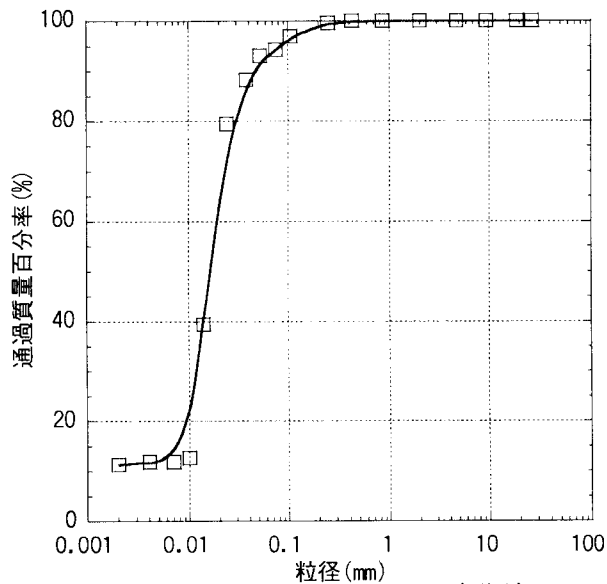


図3.1 焼却飛灰の粒径加積曲線

### 3.2.2 溶出試験結果

溶出試験方法は 3.3.3 試料の溶出試験に、分析は 3.3.5 ICP 分析に従うとする。  
 焼却飛灰の溶出試験結果を表 3.2 に示す。

表3.2 飛灰溶出結果

元素	相関係数	環境基準	濃度
		ppm	ppm
カドミウム	0.9999918	0.0100	0.0000
クロム	0.9997360	0.0500	0.0837
銅	0.9999994	-	0.0057
鉛	0.9987566	0.0100	0.0677
亜鉛	0.9999707	-	0.0487

※ここに、相関係数とは、ICP の分析において検量線を作成したときのスタンダードの濃度と検量線の相関係数であり、ICP では、この値が 1 に近ければ近いほど精度の良い結果が得られることになる。目安としては最低 0.999 以上が望ましいが、鉛については感度が悪く、この相関係数を採用した。

溶出結果を見ると、クロム、鉛、亜鉛がある程度の濃度で検出されていることがわかる。飛灰中では高アルカリであり、一般的に金属はアルカリによって不溶性の水酸化物を生じる。しかしながら、クロムや鉛などは例外として、アルカリが強くなると溶出してくるため、焼却飛灰を扱う際、問題となっている。

今回のケースにおいてもクロム、鉛は環境基準を超えた値で検出され、亜鉛についても

環境基準にはないものが高濃度で検出されたことから、これらの元素に注目し、浸透圧密による洗浄効果を調べるとする。

本実験では環境基準を土壤環境基準とする。土壤環境基準とは、環境基本法第十六条第一項による土壤の汚染にかかわる環境上の条件につき、人の健康を保護し、および生活環境を保全する上で、維持することが望ましい基準のことであり、各有害物質に対して基準値が設けられている。表 3.3 に各有害物質の土壤環境基準値を示す。

表3.3 土壤環境基準

項目	環境基準
カドミウム	検液1lにつき0.01mg以下(かつ、農用地においては米1kgにつき1mg未満)
全シアン	検液中に検出されないこと
鉛	検液1lにつき0.01mg以下
六価クロム	検液1lにつき0.05mg以下
ヒ素	検液1lにつき0.01mg以下(かつ、農用地(田に限る)においては、土壌1kgにつき15mg未満)
総水銀	検液1lにつき0.0005mg以下
アルキル水銀	検液中に検出されないこと
PCB	検液中に検出されないこと
セレン	検液1lにつき0.01mg以下
銅	農用地(田に限る)においては、土壌1kgにつき125mg未満
有機りん	検液中に検出されないこと
チウラム	検液1lにつき0.006mg以下
シマジン	検液1lにつき0.003mg以下
チオベンカルブ	検液1lにつき0.02mg以下
ジクロロメタン	検液1lにつき0.02mg以下
四塩化炭素	検液1lにつき0.002mg以下
1, 2-ジクロロエタン	検液1lにつき0.004mg以下
1, 1-ジクロロエチレン	検液1lにつき0.02mg以下
シス-1, 2-ジクロロチレン	検液1lにつき0.04mg以下
1, 1, 1-トリクロロエタン	検液1lにつき1mg以下
1, 1, 2-トリクロロエタン	検液1lにつき0.006mg以下
トリクロロエチレン	検液1lにつき0.03mg以下
テトラクロロエチレン	検液1lにつき0.01mg以下
1, 3-ジクロロプロペン	検液1lにつき0.002mg以下
ベンゼン	検液1lにつき0.01mg以下

### 3.3 実験方法

#### 3.3.1 試料の調整

飛灰 1500g を比重 1.2 になるよう水を加え（含水比では約 289%，固液比では約 1：3），試料が飽和するよう 48 時間程度静置する。

※浸透圧密においては，不飽和の試料を用いるとうまくいかない場合があるため，事前に水を加える。飛灰が多孔質であることを考慮し，適宜軽く攪拌を行った。

#### 3.3.2 浸透圧密

圧密圧力は，バックプレッシャーとして下流タンク側には空気圧 100 (kPa) をかけ，上流タンク側の空気圧は 120 (kPa)，140 (kPa)，160 (kPa)，200 (kPa) の 4 種類に変化させた。浸透圧密による実験方法を以下に示す。

- (1) 2.5 実験の準備に従い試料を圧密容器に投入し，2 時間静置する。
- (2) コンプレッサーを用いて上流側タンクの空気圧  $P_u$  および下流側タンクの空気圧  $P_b$  を所定のバックプレッシャーに相当する空気圧に設定する。
- (3) 上流側タンクの空気圧を  $P_{uj}$  に上げる。
- (4) (3) で作用させた圧力差により圧密を開始する。
- (5) 所定の時間間隔で圧密供試体の層厚と流量を測定し，その時の廃液から 150ml 程度採取する。
- (6) 6 時間圧密を行い，圧密を終了する。
- (7) 両タンクの空気圧を 0 にし，圧密容器の上蓋を取り外して供試体上部の水を排出する。
- (8) サンプリングライナーを供試体中央部に垂直に差し込み，サンプリングライナーの外側の供試体を取り除き，乱さないように内部の試料を採取する。
- (9) ライナー下部のピストンを押し上げ，ライナー上部より押し出される供試体をスライスし含水比を測定する。
- (10) 残りの脱水ケーキは後に溶出試験を行うため，110℃の乾燥炉で十分乾燥させる。

#### 3.3.3 試料の溶出試験（検液の作成）

本試験は JIS 産業廃棄物に含まれる金属等の検定方法に従うこととする。

- (1) 500ml 三角フラスコに 50g 試料を取り，超純水を 500ml 加える
- (2) 振とう回数を毎分約 200 回，振とう幅を 4cm 以上 5cm 以下に調整した振とう機を用いて 6 時間連続して振とうする。
- (3) 15 分程度静置した後，1  $\mu$ m のグラスファイバーフィルターペーパーを用い，吸引ろ過する。

- (4) 検液の pH を測定した後、硝酸を 1% 添加し、コニカルビーカーに 100ml 採取する。
- (5) 約 200℃ のプレート上に置き、全量が 15ml 程度になるまで濃縮する。
- (6) 濃縮後の検液を 4 $\mu$ m の定量ろ紙でろ過を行い、25ml メスフラスコを用い、全量が 25ml になるようメスアップを行う。  
これを検液とする。

### 3.3.4 廃液の分析（検液の作成）

- (1) 廃液から採取した検液を 1 $\mu$ m のグラスファイバーフィルターペーパーを用い、吸引ろ過する。
- (2) 検液の pH を測定した後、硝酸を 1% 添加し、コニカルビーカーに 100ml 採取する。
- (3) 約 200℃ のプレート上に置き、全量が 15ml 程度になるまで濃縮する。
- (4) 濃縮後の検液を 4 $\mu$ m の定量ろ紙でろ過を行い、25ml メスフラスコを用い、全量が 25ml になるようメスアップを行う。  
これを検液とする。

### 3.3.5 ICP 分析

分析は大学内の環境保全センターにおいて ICP（誘導結合型プラズマ発光）分析装置を利用して行った。

- (1) 前準備として、アルゴンガス、冷却水、排気のスイッチを入れ、ダクトを設置する。
- (2) 分析ソフトを立ち上げ、測定元素（Cr, Pb, Zn）を選択し、スタンダード（st）の濃度を設定する。
- (3) プラズマを点火し、10 分程度超純水を吸引させる。
- (4) st2（高濃度スタンダード、各元素 2ppm）、blank の順に測定し、元素のサブアレーで発光のピークをしっかりと捕らえているかを確認する。
- (5) st2, st1（低濃度スタンダード、各元素 1ppm）の順に測定し、検量線を作成する。
- (6) 検量線の相関係数が 0.999 以上であることを確認する。
- (7) 各検液の測定を行う。



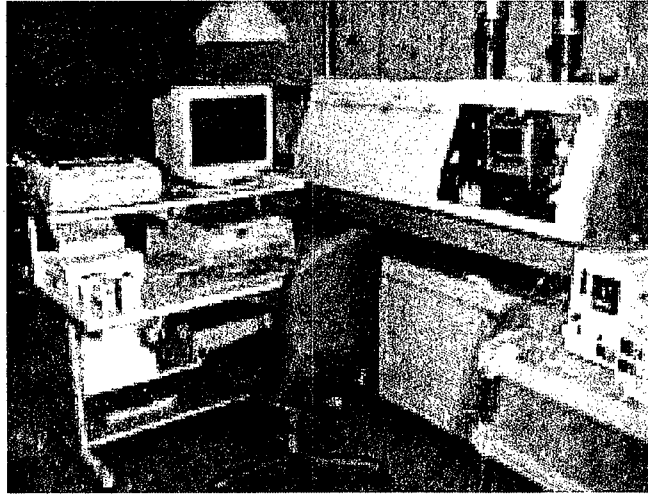


図 3.2 ICP（誘導結合型プラズマ発光）分析装置

### 3.4 実験結果

#### 3.4.1 脱水ケーキの溶出試験結果

脱水ケーキの pH を表 3.4 に、溶出試験結果を表 3.5 から表 3.8 に示す。

表3.4 洗浄後の試料のpH

圧力差(kPa)	pH
20	11.82
40	11.75
60	11.65
100	11.64

表3.5 20kPa脱水ケーキ溶出試験結果

元素名	環境基準	相関係数	濃度
	ppm		ppm
クロム	0.0500	0.9997360	0.0503
鉛	0.0100	0.9987566	0.0019
亜鉛	-	0.9999707	0.0029

表3.6 40kPa脱水ケーキ溶出試験結果

元素名	環境基準	相関係数	濃度
	ppm		ppm
クロム	0.0500	0.9997360	0.0662
鉛	0.0100	0.9987566	0.0015
亜鉛	-	0.9999707	0.0044

表3.7 60kPa脱水ケーキ溶出試験結果

元素名	環境基準	相関係数	濃度
	ppm		ppm
クロム	0.0500	0.9997360	0.0655
鉛	0.0100	0.9987566	0.0024
亜鉛	-	0.9999707	0.0154

表3.8 100kPa脱水ケーキ溶出試験結果

元素名	環境基準	相関係数	濃度
	ppm		ppm
クロム	0.0500	0.9997360	0.0817
鉛	0.0100	0.9987566	0.0001
亜鉛	-	0.9999707	0.0050

#### 3.4.2 廃液の分析結果

浸透圧密の下流タンクの廃液について、クロム、鉛、亜鉛の濃度分析を行った。分析結果を表 3.9、図 3.3 に示す。

表3.9 透水量と廃液濃度

透水量(l)	単位透水量(l)	濃度(ppm)		
		クロム	鉛	亜鉛
0.97	0.97	0.0105	0.0262	0.0109
1.44	0.47	0.0116	0.0334	0.0212
2.03	0.60	0.0107	0.0341	0.0212
2.43	0.39	0.0105	0.0326	0.0258
2.78	0.35	0.0109	0.0326	0.0227
3.08	0.30	0.0093	0.0365	0.0322
3.34	0.26	0.0075	0.0393	0.0304
4.01	0.68	0.0054	0.0382	0.0322
4.56	0.55	0.0044	0.0370	0.0335
5.63	1.07	0.0039	0.0441	0.0391
6.63	1.00	0.0035	0.0394	0.0372
7.57	0.94	0.0032	0.0450	0.0427
8.51	0.94	0.0029	0.0456	0.0397

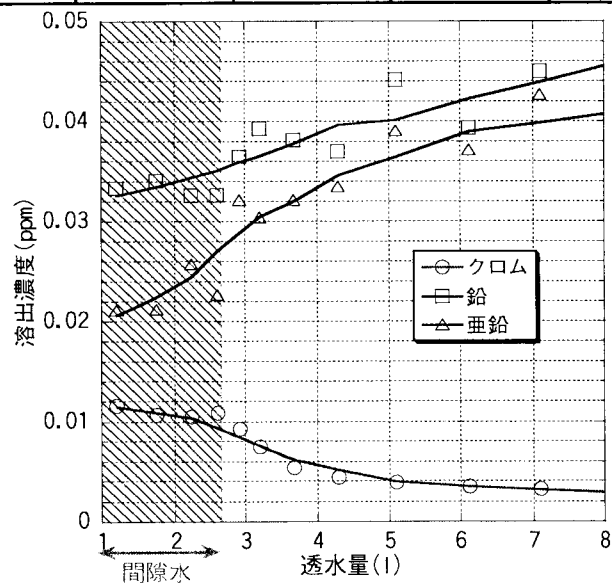


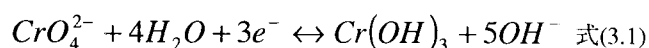
図3.3 透水量と廃液の濃度

## 3.5 考察

### 3.5.1 クロム

浸透圧密の下流タンク廃液のクロム含有量を調べたところ表 3.9 のようになった。浸透圧密によって下流タンク内にクロムが流出したのがわかる。このクロム濃度は、実験ケーキにあらかじめ含まれている間隙水量である 2.7~2.8 ㎖あたりまではほぼ等量の濃度となっており、その後減少していく。また、試験前の試料と試験後の脱水ケーキのクロム濃度を比べると図 3.4 のようになり、試験前と比べクロム濃度は減少しているものの環境基準である 0.05ppm を下回ることができなかった。

溶出するクロムの濃度が透水量の増加にともない減少していくのは、実験ケーキの pH が関係していると考えられる。焼却飛灰は、その処理過程において多量の消石灰  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  を含むため一般に強いアルカリ性を示す。また、その水溶液もアルカリ土類元素である Ca を含むため水によく溶け強いアルカリ性の液性になる。本実験でも飛灰の pH は、12.77 であった。そして、クロムはアルカリ性で以下のような反応がおこることが知られている。



また、ここで生成された  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  は水に不溶だが、pH が 10 あたりを越えると溶けはじめ pH 約 14 で全溶し  $\text{Cr}^{3+}$  が溶出してくる。ゆえに、開始時のスラリーは高アルカリ性であるため間隙水にクロムイオンが溶出し、図 3.3 のように間隙水分の透水量においてはほぼ等量の濃度がえられる。しかし、実験開始とともにスラリー内には浸透水が流入してくるため pH が下がっていき徐々にクロムイオンの溶出も減少していくため下流タンク内の廃液のクロムイオン濃度も減少していくと考えられる。また、クロムの溶出濃度が鉛、亜鉛と比べ低いのはクロムのイオン交換力が最も強いため置換され鉛イオン、亜鉛イオンを遊離させてしまいクロムイオンは他の物質と結合しやすくなっているためと考えられる。

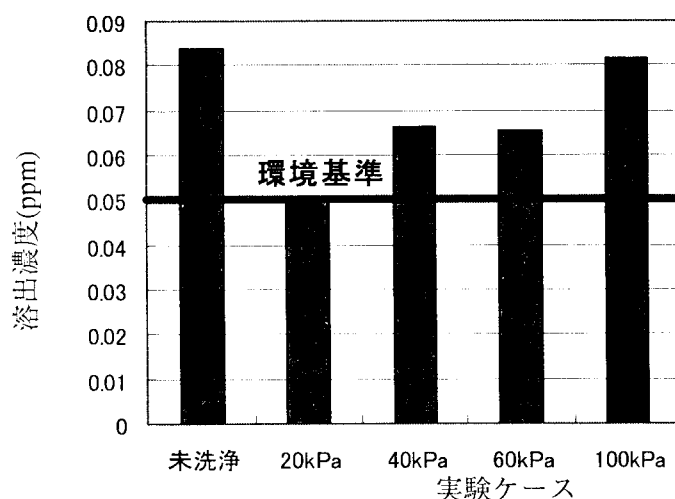


図 3.4 クロムの溶出濃度

### 3.5.2 鉛, 亜鉛

鉛, 亜鉛において下流タンクの廃液を調べたところその溶出濃度は表 3.9 のようになった。溶出濃度は透水量が増えるとともに増えていく傾向が見られた。また, 実験後の脱水ケーキの溶出試験を調べたところ図 3.5 を見てわかるように未洗浄のものと比べて実験後のケーキはどの圧力差のケースでも明らかに溶出濃度が減少したのがわかる。亜鉛は土壤環境基準で定められていないが, 鉛においては 0.01ppm 以下と定められていて今回の実験ではその基準を下回ることができた。

鉛は焼却飛灰中ではおもに酸化鉛として存在している。酸化鉛の性質としては, 両性化合物であるため中性付近では水に難溶解性であるが, 強アルカリや強酸性ではイオン化する。本実験では, スラリーは高アルカリ性のため鉛はイオンとして溶出して下流タンクの廃液で確認される。クロムと異なり透水量が増えても溶出濃度が減少しないのは, 鉛は溶液の pH9.6 付近までは溶出濃度が減るが, これ以上になると急激に溶解する性質をもっている。浸透水の流入により実験開始時と比べアルカリ性は弱まるものの溶解性が大きい pH が保たれていて鉛イオンの溶解を妨げるのにはあまり影響を及ぼしていないと考えられる。亜鉛に関してもほぼ同じようなことがいえる。

今回の実験より鉛に対しては浸透圧密による洗浄効果があったといえる。

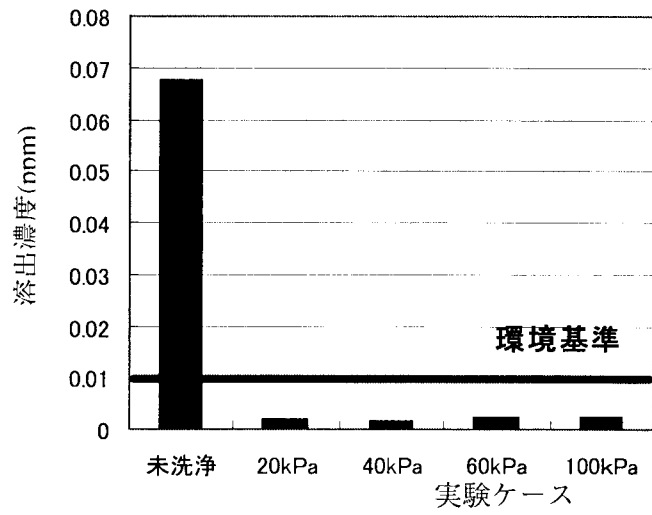


図 3.5 鉛の溶出濃度

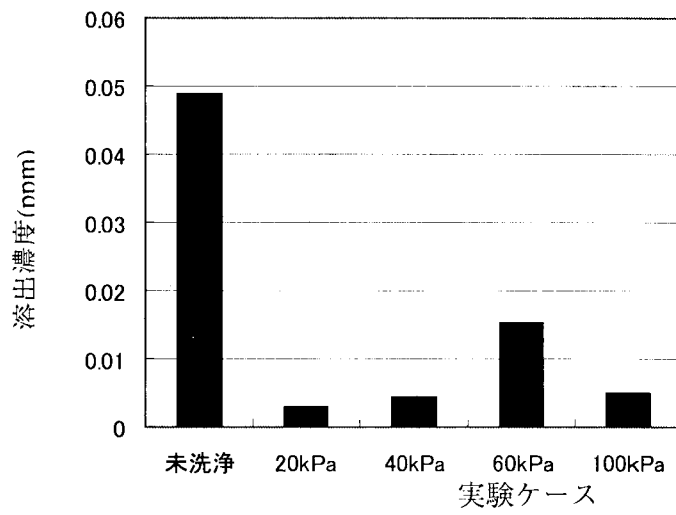


図 3.6 亜鉛の溶出濃度

## 4 浸透力を利用した建設汚泥処理方法の提案

### 4.1 供試体の剥離について

浸透圧密においては、試験中にしばしば供試体の側面が圧密容器から剥離することで知られている。理論上、浸透圧密は一次元圧密で行われるが、圧密容器と供試体の境界部では若干透水性が異なるため、供試体周辺の一次元圧密状態が崩れていることから生じていると思われる。浸透圧密試験においては周辺部をダミーとした二重環構造の圧密底板を用いることにより、試料の圧密特性を調べるという点では、剥離の影響を回避しているが、浸透圧密を脱水に利用する場合には、剥離は圧密時間、脱水ケーキの含水比に悪影響を及ぼすものと思われる。

今回の実験においてもいくつかのケースで供試体の剥離が観察され、それらは大きく二つのタイプに分けられることがわかった。

図 4.1 の剥離写真は上部のみが剥離したものである。このタイプは細粒分含有率が低く、沈降性の良い試料において見られた。この場合、沈降過程において、粒子の沈降速度が違うために分級が起これ、細粒分と砂分が分離している。剥離は圧密後半に生じ、上部のみが剥離する。これは最初ある程度透水性のあった細粒分の多い上部の圧密が進むにつれ、徐々に透水性を失っていくためと思われる。したがって、圧密終了間近になって剥離が生じるため、圧密時間やケーキ含水比への影響は小さいと思われる。

図 4.2 の剥離写真は全体が剥離したものである。このタイプは細粒分含有率が高く、沈降性の悪い試料において見られた。この場合、沈降過程において、試料の分級が起これないため、供試体下部においても細粒分を多分に含むこととなる。そのため、圧密の比較的早い段階で、下部の透水性が低くなるため、剥離を生じ、圧密時間や脱水ケーキの含水比に大きな影響を与えているものと思われる。

どちらのタイプにおいても、剥離は細粒分を多く含む部分の圧密が進み、圧密容器と供試体の境界部との透水性の差が大きくなると生じているため、剥離を生じさせなくするためには、試料全体にわたってある程度の透水性を確保する必要があると考えられる。そのため、細粒分を多く含む透水性の悪い試料の場合、凝集剤などを添加することで対応を図る必要がある。

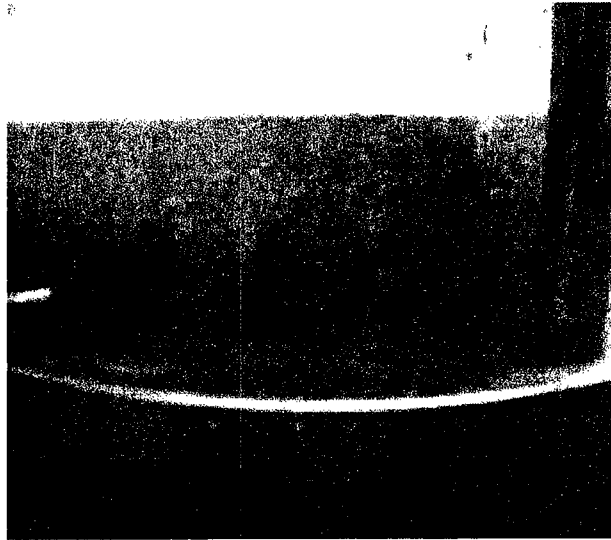


図 4.1 供試体の上部剥離写真

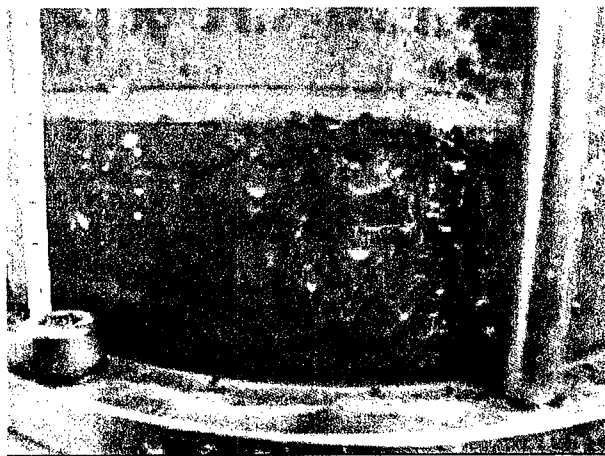


図 4.2 供試体の全体剥離写真



## 4.2 層厚と圧密時間について

層厚と圧密時間の関係について調べるために、投入量を約2倍にした、2章で用いた建設汚泥（比重 1.2）に対し、圧力差を 40kPa, 100kPa とし、浸透圧密実験を行った。実験は 2.5.4 実験方法に従うこととする。圧密量と時間の関係を図 4.3 に示す。

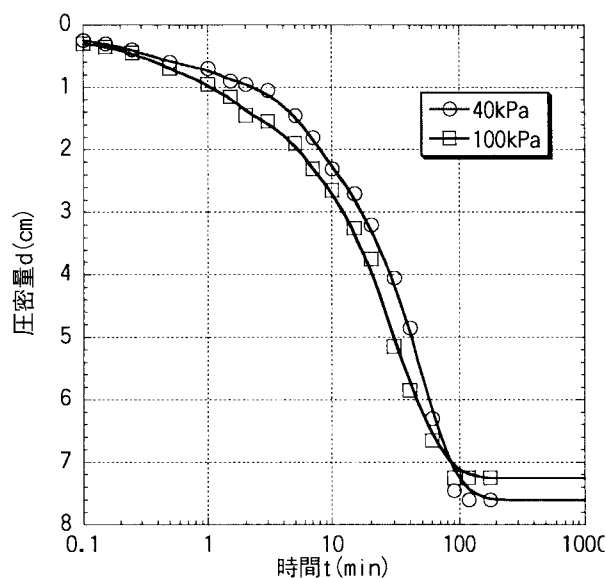


図4.3 圧密量と時間の関係

図 4.3 から 3t 法を用いて、圧密終了時間を求めた。また、圧密時間が層厚の二乗に比例していると仮定し、2.6.2 の圧密時間から推定圧密時間を求め比較を行った。これらを表 4.1 にまとめる。

表4.1 層厚と圧密時間の関係

試料	圧力	初期層厚	層厚比	圧密時間	推定圧密時間
建設汚泥	40kPa	9.55	1.97	60	—
		18.85		265	234
	100kPa	9.2	1.97	39	—
		18.1		175	151

表 4.1 より、実際の実験における圧密時間と推定圧密時間がほぼ一致していることから、浸透圧密においても圧密時間は層厚の二乗に比例すると見なすことができる。従って、本実験の層厚の 10 倍を想定した場合、推定圧密時間は 100 倍となり、約 6000 分かかることとなる。これはあまりに現実的でないため、大型の浸透圧密機を考える場合も層厚を小さくすることが時間効率の向上につながるとともに、必要条件になると思われる。

### 4.3 試設計

本項では、現在作業中の建設汚泥処理場で用いられているデハイドラムをもとに、それと同等の処理能力のある浸透圧密機を考案する。

デハイドラムの仕様を表 4.2 に示す。

表4.2 デハイドラム仕様

動力	寸法	汚泥投入量	汚泥比重	脱水ケーキ
kW	m	m <sup>3</sup> /h	g/cm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /h
5.5	3.4×10.2	20~30	1.1以下	4~5

投入時の汚泥比重が本実験の設定と異なるため、処理能力を脱水ケーキの量で判断することとし、目標脱水ケーキを 4m<sup>3</sup>/h とする。

表 4.3 に浸透圧密に 60kPa を用いた時の基本的なデータを記す。尚、表中の静置時間については、実験においては 2 時間としているものの、25 分でほぼ沈降が終了していると判断してのものである。

表4.3 基本データ

圧力差	投入汚泥高さ	汚泥比重	静置時間	圧密時間	圧密終了高さ
kPa	cm	g/cm <sup>3</sup>	min	min	cm
60	15	1.2	25	52	6

表 4.3 をもとに、圧密容器を直径 3m とした浸透圧密機の時間あたりの処理能力を表 4.4 に示す。

表4.4 浸透圧密機処理能力

圧力差	圧密容器直径	汚泥投入量	汚泥比重	脱水ケーキ
kPa	m	m <sup>3</sup> /h	g/cm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /h
60	3	0.83	1.2	0.33

得られる脱水ケーキは 0.33m<sup>3</sup>/h であるため、目標脱水ケーキ 4m<sup>3</sup>/h を達成するためには同様の圧密容器を持つ浸透圧密機が 12 基必要になる。配置については、12 基を並列するとかなりの面積を必要とするため、投入高さの面から考えても、重列式が適当あるといえる。尚、圧密に必要な圧力差 60kPa は水頭差 6m で得られるため、実質の動力は 0 である。

デハイドラムと比較すると、より大規模な装置となることが予想されるが、浸透圧密機の場合、装置規模は装置の設計によるところが大きいため、設計の仕方一つで、大幅な改善も可能であると思われる。また、凝集等の処理をすることで、静置時間、圧密時間ともに短縮できるため、処理能力的にも向上の余地がある。尚、脱水ケーキの性状的にはデハ

イドラムよりも上質のものができると思われる。

## 5 結論

本研究では浸透圧密を建設汚泥の脱水処理に利用することを目的とし、コンシステンシー、細粒分、圧力差をパラメーターとした浸透圧密試験を実施した。また、浸透圧密による洗浄効果を調べるために焼却飛灰を試料とした浸透圧密試験も実施した。以下に得られた結果を示す。

- (1) 脱水ケーキの含水比においては相対含水比を取ると細粒分やファイネスナンバーによらず一定となることがわかった。
- (2) 脱水ケーキの含水比は圧力差を 60kPa より大きくしても変化が小さいことから、今回の試料においては 60kPa で十分であるといえる。
- (3) 圧密時間はファイネスナンバーの影響を大きく受け、ファイネスナンバーが同じ試料であれば圧密時間は細粒分含有率のほぼ二乗に比例することがわかった。
- (4) 圧密時間は試料によらず、圧力差を大きくすることで改善できるが、圧密時間はファイネスナンバーに依存するところが大きく、また、試料の沈降性も大きく圧密時間に影響を与えることから、凝集剤等の添加により改善することが望ましいと思われる。
- (5) 飛灰を用いた浸透圧密の結果より、浸透圧密による洗浄効果が示されたが、元素によっては pH により、溶出量が大きく変化するため、洗浄効果を上げるためには浸透させる水の pH を変化させることも必要となる。
- (6) 供試体の剥離についてはある程度の透水性を確保することで回避できると思われ、圧密時間は層厚の二乗に比例することがわかった。

## 参 考 文 献

高田直俊ら：浸透圧密試験について（一次元圧密条件と間隙水圧の連続測定），第 30 回土質工学研究発表会，pp447-448，平成 7 年

廃棄物処理・資源化ハンドブック，産調出版

土と基礎，平成 13 年 6 月号，圧密の理論と実際

J I S ハンドブック 2002 環境測定Ⅱ水質，日本規格協会

渋谷政夫：土壤汚染の機構と解析，産業図書