

上水汚泥の定速脱水機構に関する実験的研究

佐藤 悟

Experimental Studies on Constant Rate Filtration of Sludges from Water-Treatment Plant

SATORU SATO

(昭和55年10月31日受理)

Generally speaking, the management of sludges, slurries, and other treatment debris is a troublesome task in water purification and wastewater treatment, so the sludge management may indeed be a prime determinant in designing water-purification plant.

This study is the analysis of the constant rate filtration of sludges, which is one of the most economical dewatering operations. In order to identify waste solids behavior during constant rate filtration, we transformed and analyzed the Kozeny-Carman equation and made a compression permeability test.

1 はじめに

現在の水需要の増加、浄水場敷地の制限等により濾過法としての急速砂濾過法は我国浄水場の主流になるまでにいたっている。そのため、これに伴う大量の上水汚泥の発生を防ぐことはほぼ不可能な状況にある。上水汚泥は下水、し尿汚泥とは異なり無機質が主成分であり有害物質を含んでいないため、従来その処分法としてはそのまま河川に希釈放流することが行なわれてきた。しかし近年の排水・廃棄物量の爆発的增加とともに水質汚濁、富栄養化、土壌汚染等が大きな社会問題となり、また用水量の増大と相まって上水汚泥の質的悪化、量的増大を招いている。そのため今日では上水汚泥の無処理放流は、水質汚濁防止法等により一般産業廃棄物と同等の取扱いがなされている。ところで上水汚泥は凝集過程で生じる粘土コロイドと水酸化アルミニウムとのフロックであり、粒径も80%以上が5 μ m以下と非常に微細であるため沈降性は悪く、脱水性もきわめて困難なものである。上水汚泥の処理はこの難脱水性を解消し、処分可能な低含水率の汚泥に変えることであり、法施行までの間に数多くの脱水機および種々の処理技術が考案開発されたが、法施行までの時間的余裕が少なかったため単に含水率を下げるだけの技術に終始した感があった。そのため明確な脱水機構までは解明されず、運転は経験によってなされたものも多く見受けられた。

本研究は、処理操作性からもまた経済性、処理効

率からも有利な加圧脱水の1プロセスである定速脱水に着目し、取水源の異なる上水汚泥について圧搾速度、および初期含水率を変化させた定速圧搾実験を行ない、ケーキ層の含水率分布、圧搾圧力の時間および最終含水率の変化等について検討したものである。また同時に圧縮透過実験を行ない、汚泥粒子間有効圧力に対する空隙率、および透水係数等を求め上水汚泥のもつ基本的特性について考察を加えたものである。

2 濾過理論

濾過方程式はDarcy則にならって次式で示される。

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{d\theta} = \frac{Pg_c}{\mu R} \quad (1)$$

いま濾材および全ケーキ層を通過する流量が等しいと仮定するならば、次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \frac{1}{A} \frac{dV}{d\theta} &= \frac{P_c g_c}{\mu(R_c + R_m)} = \frac{P_m g_c}{\mu R_m} = \frac{(P - P_m)g_c}{\mu R_c} \\ &= \frac{(P - P_m)g_c}{\mu \alpha R W} \end{aligned} \quad (2)$$

このケーキ抵抗 R_c はケーキの厚さ、すなわちケーキ質量 W_s に比例すると考えてRuthは比抵抗 α を次式で定義した。

$$R_c = \alpha \frac{W_s}{A} = \alpha w \quad (3)$$

またケーキ内の物質収支式は次式となる。

$$w = \frac{\rho_s}{(1-ms)} \frac{V}{A} \quad (4)$$

Ruth は(3), (4)式を(2)式に代入し, 次の濾過方程式を得た。

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{d\theta} = \frac{Pg_c}{\mu \alpha w} = \frac{Pg_c(1-ms)A}{\mu \rho_s (V+V_m)} \quad (5)$$

一方, Carman は粒状層の透過に関する Kozeny 式がそのまま濾過に適用できるとした。

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{d\theta} = \frac{n^3}{kS_0^2(1-n)^2} \frac{g_c P}{\mu L} \quad (6)$$

上式は Kozeny 式, または Kozeny-Carman 式と呼ばれ, 粒状層内の層流運動の基礎式として広く用いられている。k を Kozeny の定数といい, その値は粒状層の空隙率, 粒子の形状, 配列などによって変化するが普通 $k \approx 5.0$ とされている。なお Dallanvalle は丸味のある粒子で $k = 6.1$, とがった粒子で 7.6, 角ばった粒子で 7.7 になるとしている。

また Carman は(6)式の適用範囲を次の様にした。

1. 流体は非圧縮性で全空間を充たす。
2. 層内の空間はすべて流れに対して有効である。
3. 層内では空隙は不規則に配列され, その大きさは層内至るところで等しい。
4. 充填層の空隙率は 0.3~0.85 である。
5. S_0 の値は $60 \sim 20000 (\text{cm}^2/\text{cm}^3)$ とする。
6. 粒子の形は球形またはそれに近いものから, その混合物でも成立する。
7. 拡散または表面効果がない。

濾過の際, 問題となる粒子では S_0 の値はさらに大きい。白戸は濃厚な汚泥において kS_0^2 の値が $1.3 \times 10^{10} (1/\text{cm}^3)$ に至るまで(6)式が成立するとしている。白戸らは定圧濾過に(6)式を応用するため, あらゆる瞬間にケーキ圧縮圧力 P_s と空隙率 n が常に平衡関係を保つと仮定し, さらに濾過圧力 P とケーキ圧縮圧力および液圧 P_x との間に(7)式が成立し, ケーキ内の物質収支式(8)式を用いて(9)式を導いた。

$$P = P_s + P_x \quad (7)$$

$$dw = \rho_s(1-n)dx' \quad (8)$$

$$\frac{1}{A} \frac{dV}{d\theta} = \frac{\rho_s g_c}{\mu w} \int_0^{P_0} \frac{n^3}{kS_0^2(1-n)} dP_x' \quad (9)$$

(2)式と(9)式から濾材の抵抗を無視できるとすると, 平均比抵抗 α_R は(10)式で表わされる。

$$\alpha_R = P_0 / \rho_s \int_0^{P_0} \frac{n^3}{kS_0^2(1-n)} dP_x'$$

$$\text{または } \alpha_R = P_0 / \int_0^{P_0} \frac{1}{\alpha_x} dP, \quad (10)$$

また単位面積上に堆積した単位質量の粒状固体層が流れに与える抵抗の部分比抵抗 α_x は, Ruth の濾過比抵抗の定義にならない(11)式で表わされる。

$$\alpha_x = kS_0^2(1-n)/(\rho_s n^3) \quad (11)$$

したがって, 圧縮透過実験で各圧縮圧力 P_s に対する平衡空隙率 n と透水係数 k_D を(6)式を変形した次式に代入し, n と kS_0^2 の関係を求め, (10)式を積分すれば各濾過圧力に対する平均比抵抗 α_R を推定できる。

$$kS_0^2 = \frac{\gamma g_c}{\mu} \frac{n^3}{(1-n)^2} \frac{1}{k_D} \quad (12)$$

定速圧搾において(9)式を利用するには次の手法による。単位排水面積当りの搾液量は $q \cdot \theta_f$ で表わす事ができるため, 固形物量 $w (g/\text{cm}^2)$ は(4)式を用いて次式で表わされる。

$$w = g \theta_f \frac{\rho_s}{(1-ms)} \quad (13)$$

(13)式を Kozeny-Carman 式に代入して

$$q = \frac{dV}{A d\theta_f} = \frac{\rho_s g_c (1-ms)}{\mu g \theta_f \rho_s} \int_0^{P-P_m} \frac{n^3}{kS_0^2(1-n)} dP_x' \quad (14)$$

$$\left\{ \frac{\rho_s \mu}{(1-ms)} q^2 \right\} \theta_f = \rho_s \int_0^{P-P_m} \frac{n^3}{kS_0^2(1-n)} dP_x'$$

したがって, 圧縮透過実験結果を用いければ圧搾圧力 $(P-P_m)$ と時間 θ_f の関係が推定できる。

記号

A : 濾過面積	V : 濾液量
g_c : 重力換算係数	θ_f : 圧搾時間
μ : 粘性係数	s : 濃度分率
ρ : 濾液の密度	n : 空隙率
L : 試料厚	P_x' : 位置 x' での液圧
P_s : ケーキ圧縮圧力	ρ_s : 粒子密度
m : ケーキ湿乾質量比	
S_0 : 単位体積当りの比表面積	
w : 単位面積当りの乾燥固形物量	

上水汚泥の定速脱水機構に関する実験的研究

P_c : ケーキによる圧力損失

P_m : 濾材による圧力損失

3 実験試料および実験方法

3-1 実験試料

実験に用いた上水汚泥は、宮城県岩沼市玉崎浄水場より採泥したA汚泥と、宮城県名取市高館浄水場のB汚泥の2種類である。各汚泥は実験の前にフルイ(74 μ m)で粗大ゴミを除去し、自然沈降濃縮したものであり、初期含水率調整にあたっては遠心分離濃縮によった。なお各汚泥の物理的・化学的特性値を表-1に示した。

3-2 圧縮透過実験

圧縮透過実験とは、各圧縮圧力に対して平衡空隙率 n を示す均一圧縮ケーキを形成させ、この圧縮ケーキの透過能力を測定する操作をいう。圧縮透過実験装置は土質力学で用いられる圧密試験機の原理を利用し、各圧縮圧力段階の平衡時に透水実験ができるように改良したもので、図-1にその概要を示した。なお実験にあたっては初期試料厚は30mm、かつ両面排水とし、また荷重荷載時間は一般に粘土の一次圧密が終了するといわれる一時間を標準とし、この時を圧縮ケーキの平衡状態と仮定した。また圧密容器中の試料にかかる圧力は、排水面に埋め込まれている小型圧力変換器(直径8mm、容量5kg/cm²)によって電氣的に計測した。試料が平衡に達した後に、試料の透水性がよい場合には定水位透水実験、透水性が悪い場合には変水位透水実験をバルブの操作によって行なった。以上の操作を載荷荷重を増加させながらくり返し、最終荷重段階平衡時における試験が終了後容器をすばやく解体し、湿潤質量および乾燥重量を測定した。この結果と各荷重段階平衡時のケーキ厚から、各荷重段階における試料の空隙

表-1 各汚泥の特性値

試料名	汚泥 A	汚泥 B
浄水場名	岩沼市 玉崎	名取市 高館
取水源	阿武隈川	樽水ダム
薬注量	PAC25ppm	PAC25ppm
SiO ₂ (%)	44.72	20.41
Al ₂ O ₃ (%)	24.06	36.90
Fe ₂ O ₃ (%)	3.96	2.52
MnO (%)	0.25	—
強熱減量 (%)	19.69	38.10
粒子密度	2.47	2.24

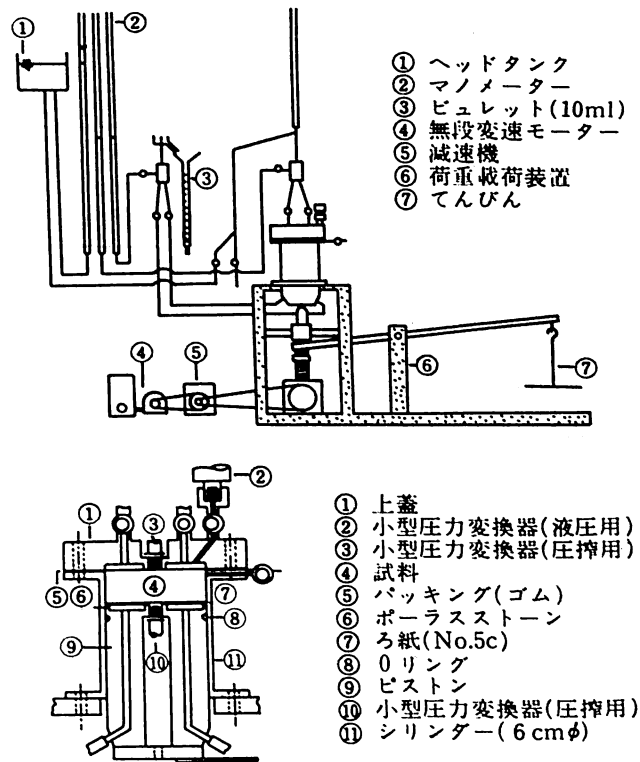


図-1 実験装置の概要

率あるいは間隙比を算定することができる。

3-3 定速圧搾実験

定速圧搾とは搾液量を一定とする圧搾操作であり、操作条件および試料の性質と圧搾圧力との関係を明らかにすることが重要である。実験装置は圧縮透過実験で用いたものと同じで、バルブの切換えにより圧搾実験装置のみを用いたものである。なお初期試料厚は20mm、排水は片面排水とし、ひずみ制御装置を用いてピストンを一定速度で押し上げて、単位時間ごとの搾液量を一定に保った。同時にこの時の排水面および不透水面圧力、不透水面の液圧を電氣的に計測しグラフに記録した。また定速圧搾中のケーキ内含水率分布の変化をみるために、不透水面の圧力が約4000 (gf/cm²) に達した時に圧搾を止め、すばやく容器を解体し排水面から3mmまでは0.5mmごとに、3mm以上は1mmごとにケーキをスライス化する事によって各層における含水率を求めた。なお濾材としては、濾紙 (No. 5C) を用いた。

4 結果および考察

4-1 圧縮透過実験結果および考察

表-2 脱水の立場からみた液性限界値

試料名		汚泥A	汚泥B
液性限界	空隙率	0.9026	0.9586
nとlog ₁₀ P _s が直線関係を示す点	空隙率	0.9150	0.9450
	圧力P _s (gf/cm ²)	200	300

表-3 脱水の立場からみた塑性限界値

P _s (gf/cm ²)	汚泥 A	汚泥 B
6000	0.7836	0.8691
8000	0.7724	0.8623
10000	0.7636	0.8570
12000	0.7565	0.8527
15000	0.7478	0.8475
20000	0.7365	0.8407
30000	0.7206	0.8311
塑性限界のn	0.7640	0.8520

4-1-1 各ケーキ圧縮圧力 P_s に対する平衡空隙率 n の関係

図-2にケーキ圧縮圧力 P_s に対する平衡空隙率 n の関係を示す。各試料の n と P_s の関係は次式の様にあらわせる。

汚泥A $n = 1.12438 - 0.090187 \log_{10} P_s$

汚泥B $n = 1.07411 - 0.054273 \log_{10} P_s$

Al(OH)₃ $n = 1.04894 - 0.031990 \log_{10} P_s$

ここで n と log₁₀P_s の直線関係が成立しはじめる時の圧縮圧力は 200 ~ 300 (gf/cm²) である。この時の空隙率 n と液性限界時の空隙率 n とは、表-2に示すようにほぼ一致する。すなわち試料が塑性状態に入ると、n と log₁₀P_s が直線を示すと考える事ができる。

一方、表-3は塑性限界時の空隙率と各圧縮圧力時の空隙率の関係を示したものであるが、この表より塑性限界時の空隙率は、圧縮圧力が約10000 (gf/cm²) 時で脱水した時に得られるケーキの脱水状態を示す指標として考える事ができる。

4-1-2 空隙率 n と kS₀² および部分比抵抗 α_s の関係

図-3に空隙率 n と、Kozeny-Carman 式中の定数 kS₀² の関係を示す。各汚泥および汚泥モデルとして考えた水酸化アルミニウムの n と kS₀² との間には、次に示す実験式が成立した。

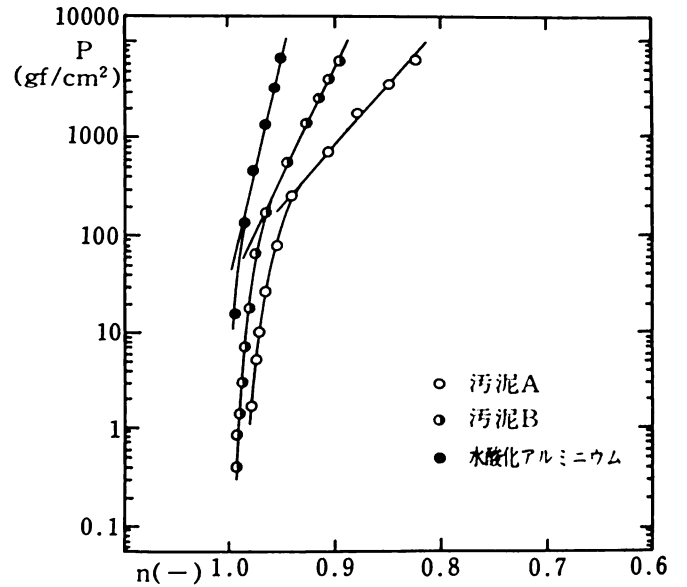


図-2 圧縮圧力と平衡空隙率の関係

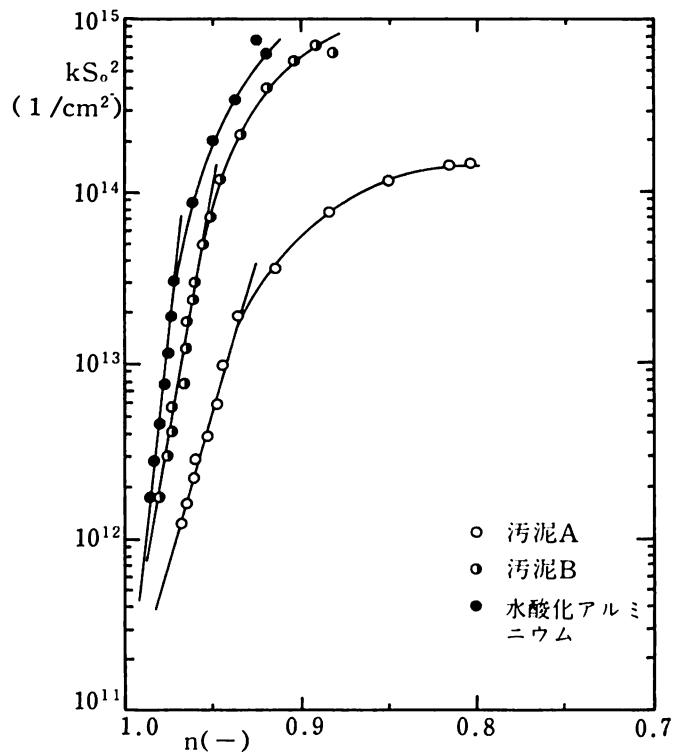


図-3 空隙率と定数 kS₀² の関係

汚泥A $\log_{10} kS_0^2 = 44.7809 - 33.7896 n$
n > 0.940

汚泥B $\log_{10} kS_0^2 = 83.6245 - 72.1022 n$
n > 0.972

Al(OH)₃ $\log_{10} kS_0^2 = 133.0447 - 121.7624 n$
n > 0.982

上水汚泥の定速脱水機構に関する実験的研究

この図から Al_2O_3 分が約37%を示すB汚泥の n と kSo^2 の関係が、水酸化アルミニウムの特性に酷似している事が知れる。

図-4は、前述した n と kSo^2 の関係を用い、(II)式によって部分比抵抗 α_x を求めたものである。図-4より同一の空隙率における α_x 値は、 SiO_2 分の大きいほど小さい事が知れる。

4-2 定速圧搾実験結果および考察

定速圧搾実験条件および結果を表-4に、圧搾圧力と時間との関係を図-5、図-6に示した。

4-2-1 圧搾速度および初期含水率が圧搾圧力と時間との関係に与える影響

圧搾圧力 P と時間 θ_t との間には、圧搾圧力が約 $100(gf/cm^2)$ 以上の領域で次の実験式が成立した。

$$P = a \cdot \theta_t^b \quad a, b; \text{実験定数}$$

ただしこの実験式は、初期含水率が低くなる（初期固形物濃度が大きくなる）につれて成立しにくくなり、この場合むしろ片対数紙上でよい直線関係を見せる事が多かった。いまこの式中で、 b 値が大きい場合は圧搾圧力がある時間以後に急激に増加する事を意味し、また小さい場合には初期より圧力発現があり、時間とともに徐々に圧力が増加する事を意味する。いま圧搾速度 q の増加に伴ってA汚泥では b 値が減少するのに対し、湖沼系のB汚泥の初期含水率が比較的高い場合には、むしろ増加しているのは興味深い。なお図-5には遠心時間5分で処理した各汚泥の、また図-6には同様に40分で処理した各汚泥の圧力と時間の関係を示した。初期含水率が低い場合、圧力発現は圧搾初期より生じるため b 値は

表-4 定速圧搾実験条件および結果

試料	初期含水率 $w_0(\%)$	定速圧搾速度 $q(cm/min)$	最終操作条件			解析結果		適用圧力範囲 $P(gf/cm^2)$
			最大圧力 $P_M(gf/cm^2)$	搾液量 $Lo-L(cm)$	操作時間 $\theta_t(sec)$	$P = a \cdot \theta_t^b$		
						a	b	
汚泥A	94.30	0.025	4071	1.577	3827	4.923×10^{-18}	5.767	$103 < P < 1233$
		0.05	4071	1.227	1507	1.785×10^{-9}	3.845	$67 < P < 3011$
		0.1	4056	0.726	446	1.904×10^{-7}	3.891	$121 < P$
		0.2	4043	0.442	134	2.317×10^{-4}	3.396	$138 < P$
	92.42	0.025	4010	1.379	3319	2.174×10^{-13}	4.550	$91 < P < 1877$
		0.05	4019	1.055	1303	4.480×10^{-8}	3.472	$106 < P$
		0.1	4038	0.618	380	2.962×10^{-6}	3.524	$177 < P$
		0.2	4075	0.392	124	3.081×10^{-4}	3.375	$143 < P$
	90.78	0.025	4037	1.166	2861	1.103×10^{-8}	3.293	$135 < P < 2178$
		0.05	4056	0.750	918	1.583×10^{-6}	3.155	$129 < P$
		0.1	4141	0.437	267	3.022×10^{-3}	2.467	$95 < P$
		0.2	4179	0.275	87	3.504×10^{-2}	2.527	$93 < P$
88.21	0.025	4047	0.957	2343	2.237×10^{-5}	2.370	$135 < P < 2209$	
	0.05	4066	0.610	750	2.253×10^{-4}	2.498	$172 < P$	
	0.1	4103	0.350	216	4.335×10^{-2}	2.063	$108 < P$	
	0.2	4056	0.209	67	1.956×10^{-1}	2.286	$212 < P$	
汚泥B	96.91	0.025	4059	1.531	3673	5.394×10^{-6}	2.329	$19 < P < 823$
		0.05	4021	0.950	1142	2.411×10^{-6}	2.955	$66 < P$
		0.1	4049	0.577	346	3.117×10^{-5}	3.191	$79 < P$
		0.2	4059	0.380	117	1.068×10^{-3}	3.173	$100 < P$
	96.65	0.025	4039	1.402	3402	5.630×10^{-7}	2.723	$64 < P < 1991$
		0.05	4039	0.808	997	3.227×10^{-6}	3.000	$118 < P$
		0.1	4039	0.478	291	1.892×10^{-4}	2.959	$93 < P$
		0.2	4082	0.323	104	1.223×10^{-2}	2.710	$149 < P$
	95.68	0.025	4077	0.897	2172	1.939×10^{-5}	2.431	$110 < P < 1944$
		0.05	4048	0.506	615	8.731×10^{-4}	2.714	$159 < P$
		0.1	4039	0.304	181	1.065×10^{-2}	2.427	$110 < P$
		0.2	4096	0.215	70	6.355×10^{-1}	2.007	$80 < P$
94.31	0.025	4009	0.610	1510	3.827×10^{-4}	2.196	$174 < P$	
	0.05	4060	0.325	410	3.235×10^{-2}	1.897	$174 < P$	
	0.1	4028	0.204	127	4.571×10^{-7}	1.832	$142 < P$	
	0.2	4062	0.165	54	6.137×10^0	1.576	$100 < P$	

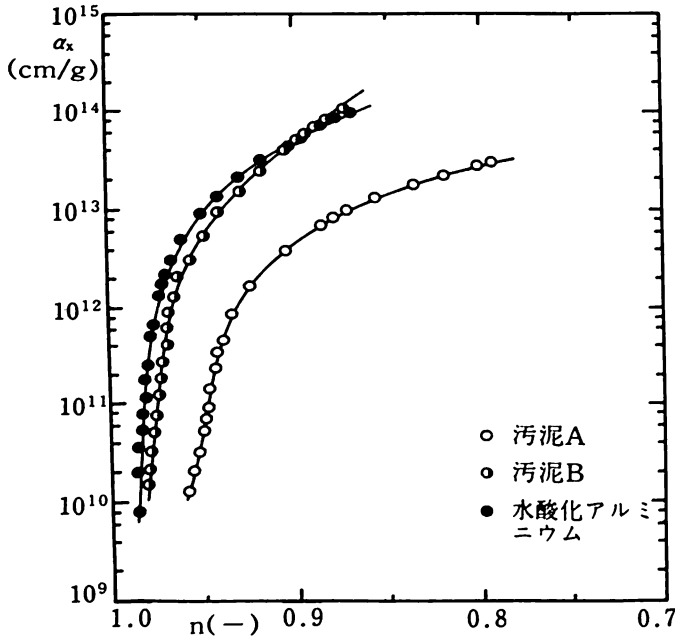


図-4 空隙率と部分比抵抗の関係

減少するようになる。しかし、初期含水率が低下すれば圧搾圧力と時間との関係は、両対数紙上よりもむしろ片対数紙上で直線関係を示すようになるため厳密には比較できないと考えられる。

4-2-2 ケーキ含水率分布

図-7, 8に各汚泥の初期固形物濃度別のケーキ内含水率分布の実測値を示した。測定時の不透水面の全圧搾圧力Pは約4000~4100(gf/cm²)である。各試料ともに、圧搾速度が小さいほど脱水はケーキ上層まで進行しており、また排水面付近の含水率低

下割合も小さくなる。ここでA汚泥では、圧搾速度が変化すると各濃度ともケーキ上層の含水率値に差が生じ、未脱水層から脱水された層への移行がゆるやかであるが、B汚泥では圧搾速度が変化してもケーキ上層の含水率値の差がほとんどなく、また移行も急である。これらより、B汚泥はA汚泥よりも著しく脱水性が悪い事が推察される。

4-2-3 ケーキ内液圧分布

いま述べた含水率分布を空隙率分布におきかえ、圧縮透過実験より得られた空隙率nとケーキ圧搾圧力P₀の関係(図-2)よりP=P-P₀によって、ケーキ内の液圧分布を求めたのが図-9である。0~0.5mm層の圧力損失は、圧搾速度が0.2(cm/min)の場合両汚泥とも9割以上に達する事がわかる。またA汚泥は排水面付近におけるケーキ含水率低下がB汚泥よりも著しいにもかかわらず、圧力損失はB汚泥よりも小さい結果が得られた。

これらの結果より、湖沼系のB汚泥は汚泥中に多量に含まれる有機物、あるいは凝集剤に由来して形成される水酸化アルミニウムのため、脱水性が著しく悪化している事が推察された。

5 ま と め

上水汚泥の脱水実験の結果および考察を要約すると次の様になる。

- (1) 汚泥の空隙率が液性限界よりも小さくなると空隙率と汚泥粒子間有効圧力 log₁₀P₀ の関係は直線で近似できる。

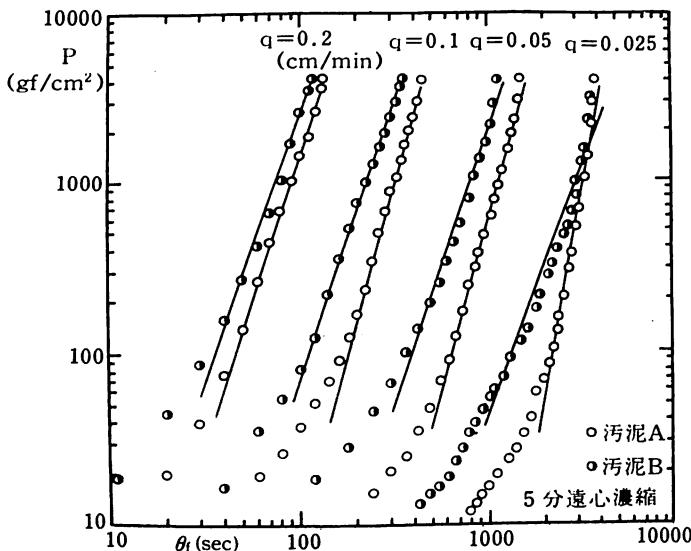


図-5 時間と圧搾圧力の関係(その1)

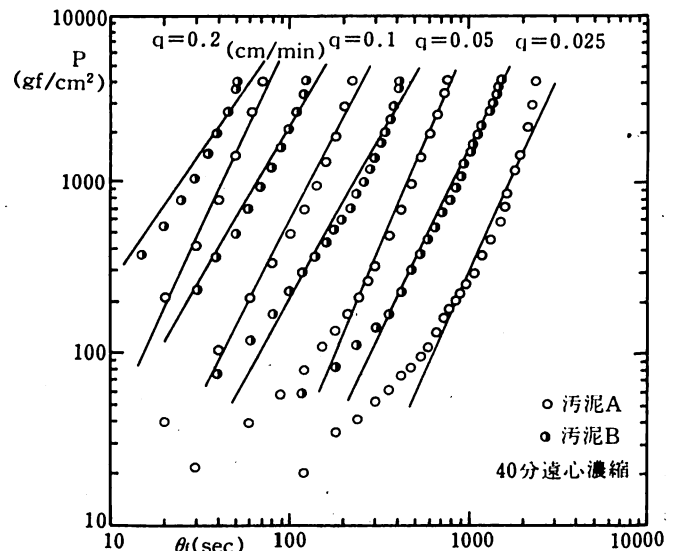


図-6 時間と圧搾圧力の関係(その2)

上水汚泥の定速脱水機構に関する実験的研究

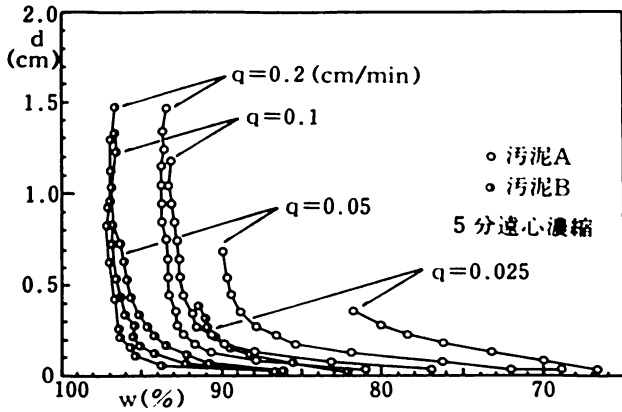


図-7 ケーキ内含水率分布 (その1)

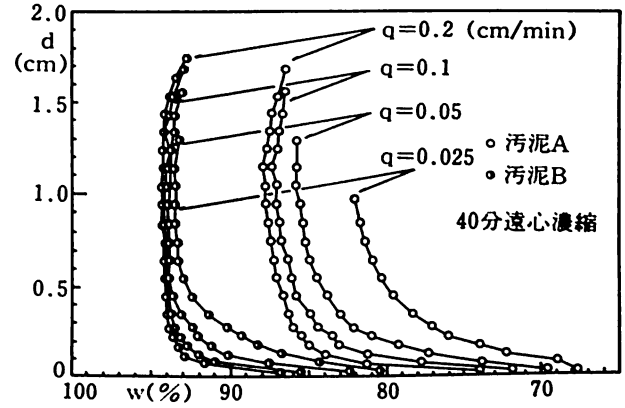


図-8 ケーキ内含水率分布 (その2)

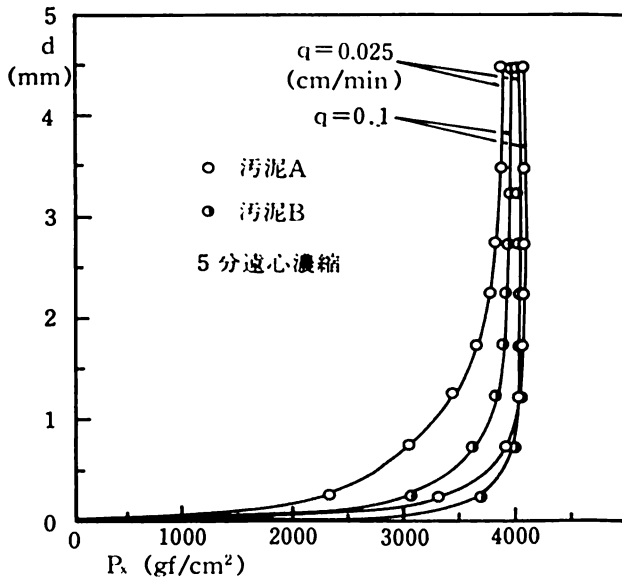


図-9 ケーキ内液圧分布

- (2) 塑性限界時の空隙率は、圧縮圧力が約10000 (gf/cm²) 時のケーキ平衡空隙率に等しい。
- (3) 空隙率と Kozeny-Carman 式中の定数 kS_0^2 の間には、初期において直線に近似できる。
- (4) 全圧搾圧力と圧搾時間の関係は、圧力が約100 (gf/cm²) 以上のところではほぼ対数紙上で直線に近似できる。ただし初期含水率が低下する

と、この傾向からはずれてくる。

- (5) 圧搾速度が小さいほど脱水はケーキ上層まで進行し、また排水面付近の含水率低下も小さくなる。
- (6) 排水面の圧力損失は、有機物量、Al₂O₃分が多いほど、また圧搾速度が大きいほど大きい。

なお本研究を行なうにあたり、終始御指導いただきました東北大学工学部土木工学科、佐藤敦久教授ならびに助手、後藤光亀氏に深甚な謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 佐藤敦久：上水汚泥の定速脱水機構に関する研究
- 2) 佐藤敦久：日本における汚泥処理技術，水道協会雑誌，P73～P77，第528号，1978年
- 3) 後藤光亀：第16回衛生工学研究討論会講演論文集，1980年1月25～26日
- 4) 白戸絞平：定速圧搾とその解析
- 5) 村瀬敏朗：化学工学，第34巻，第8号，1970年
- 6) 白戸絞平：濾過のメカニズム，6-5，定速濾過，P165～P171