

(3) 上水汚泥の定圧脱水機構に関する研究

東北大学工学部 佐藤 敦久
〃 〃 〇後藤 光亀

1. はじめに

従来、定圧脱水実験は上水汚泥にある処理操作を加えた場合、平均比抵抗がいかに変化するかに重点がおかれ、ケーキ内部はブラックボックス的扱いがなされてきた。そのため、上水汚泥の定圧脱水時におけるケーキ内部の脱水過程を実測した報告は少ない。

そこで、本研究は定圧脱水時のケーキ内含水分率分布を実測し、圧縮透過実験結果を用いて上水汚泥の脱水特性について考察を加え、また、単位面積の排水面上に堆積した固形物量をケーキ内の位置を表わす変数とした圧密理論を適用して、定圧脱水機構について理論的解析と実験的検討を加えたもので、ここに、若干の知見を得たので報告する。

2. 実験試料

試料は、河川を取水源とする岩沼市T浄水場の排泥池から採泥した上水汚泥で、 $74\mu\text{m}$ のふるいを通して粗大ゴミを除去し、約2ヶ月間自然沈降濃縮した（含水率約95.6%）。さらに、遠心分離器（約2100rpm）でそれぞれ、5、10、20、40分間濃縮し所定の濃度に調整した。この汚泥の特性値を表-1に示す。

3. 実験装置および方法

3-1 圧縮透過実験 上水汚泥の脱水特性を知るため、均一

圧縮ケーキの諸特性値を圧縮透過実験によって求めた。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、各荷重段階平衡時に透水実験ができるように改良したもので、バルブの操作によって片面、両面排水が可能である。図-1にその概要を示す。ろ材にろ紙（No.5c）を用い、初期試料厚 L_0 は3cmとした。各初期含水率 w_0 （95.53、92.11、88.61（%））の試料をシリンダー内に入れ、蓋とシリンダーのフランジ部を固定する。このとき、余剰の汚泥は④のバルブより吐出される。蓋の上部に透水実験用のガラス管を取り付け、④と⑤の水位を等しく保つ。てんびんに静かに荷重を載荷し下方より試料に圧縮圧力Pを与えて両面より排水させ、試料厚Lの変化をダイヤルゲージで読み取る。荷重載荷時間は1時間とし、このときを圧縮ケーキの平衡状態と仮定した。この時間は一般に粘土の一次圧密が終了する時間に相当する。圧縮中の試料上下端面の圧力は、排水面に接するように埋め込まれている直径8mm、容量5（ $\text{kg-f}/\text{cm}^2$ ）

表-1 試料の特性値

項目	測定値
SiO_2	51.4 [%]
Al_2O_3	19.7 [%]
$\text{I}_{\text{g-loss}}$	15.0 [%]
その他	13.9 [%]
粒子密度 ρ_s	2.38 [g/cm^3]
50%粒径	3.3 [μm]
液性限界	含水比：340 [%]
	含水率：77.4 [%]
塑性限界	含水比：110 [%]
	含水率：52.3 [%]

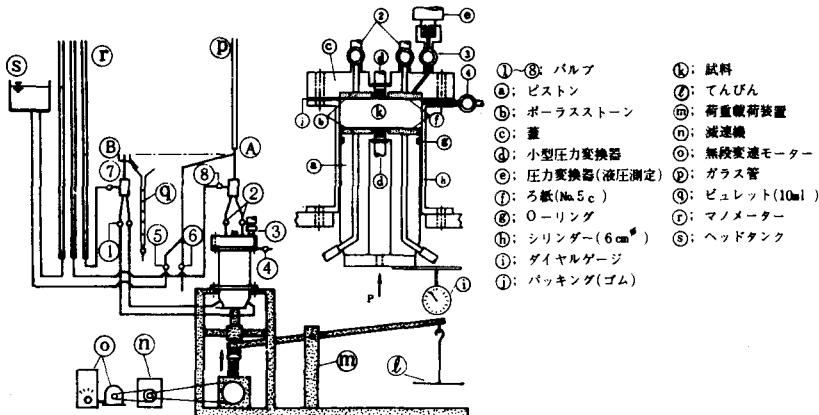


図-1 圧縮透過実験装置の概要

の小型圧力変換器によって電氣的に計測される。また、圧縮中、Oーリングとシリンダー壁等の摩擦によって圧縮圧力が低下するときには、ひずみ制御装置(⑨、⑩)によってピストンを強制的に押し上げ圧縮圧力を一定に保った。試料が平衡に達した後、試料の透水性にあわせて定水位あるいは変水位透水実験をバルブの操作によって行なう。以上の操作を載荷荷重を増加させながら繰り返す。各荷重段階平衡時の試料の空隙を表わす指標は次式で求める。

$$w = \frac{W_s}{A_c} = \frac{\rho \rho_s (1 - w') L}{w' (\rho_s - \rho) + 100 \rho} \dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} w' &= 100 n \rho / (\rho_s - n (\rho_s - \rho)) \\ e &= (L \rho_s / w_0 - 1) \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

w' ; 含水率(%) ; w_0' ; 初期含水率(%)

w ; 単位断面積当りの乾燥固形物量(g/cm^2)

w_0 ; (1)式で $L = L_0$, $w' = w_0'$, W_s ; 乾燥固形物質量(g)

A_c ; シリンダーの断面積(cm^2), e ; 空隙比(—)

ρ ; ろ液の密度(g/cm^3), n ; 空隙率($= e/(1+e)$)(—)

3-2 定圧脱水実験 定圧脱水実験は、図-1の実験装置で下端からだけの片面排水とし、試料の初期含水率および脱水圧力を変化させて行なった(表-2)。初期試料厚 L_0 は2[cm]で、ろ材にろ紙(No.5c)を用いた。脱水中の不透水面の液圧変化を容量2[$kg-f/cm^2$]の圧力変換器で測定した。その他の方法は圧縮透過実験方法に準ずる。脱水は、不透水面の液圧がほぼゼロになるまでと任意の搾液量のときに実験を中断した場合とについて行ない、それぞれの試料を排水面から3[mm]までは0.5[mm]ごとに、3[mm]以上は1[mm]ごとにダイヤルゲージの読みに合わせてスライス化し、各ケーキ層の含水率 w' を求めた。

4 理論的解析

白戸¹⁾らは、定圧ろ過にKozeny-Carman式を適用するため、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、(3)、(4)式を用い、Ruthのろ過速度式と比較して平均比抵抗 α_R を(5)式で与えた。したがって、圧縮透過実験で各ケーキ圧縮圧力に対する平衡空隙率 n と透水係数 k_D をKozeny-Carman式を変形した(6)式に代入し、 n と $k_S O^2$ の関係を求め、(5)式の積分値を求めれば各ろ過圧力に対する平均比抵抗 α_R が推定できる。

$$P = P_s + P_{x'} \dots (3)$$

$$dw = \rho_s (1 - n) dx' \dots (4)$$

$$\alpha_R = P / \rho_s \int_0^P \frac{n^3}{k_S O^2 (1 - n)} dP_{x'} \dots (5)$$

$$k_S O^2 = \frac{\gamma g c n^3}{\mu (1 - n)^2} \cdot \frac{1}{k_D} \dots (6)$$

$g c$; 重力換算係数($dyne/g-f$)

P ; ろ過圧力($g-f/cm^2$), α_R ; 平均比抵抗(cm/g)

P_s ; ケーキ圧縮圧力($g-f/cm^2$), k ; Kozeny定数(—)

$P_{x'}$; 位置 x' での液圧($g-f/cm^2$), S_0 ; 単位体積当りの比表面

x' ; ケーキ表面からの距離(cm), 積(cm^2/cm^3)

dw ; 厚さ dx' 内の w (g/cm^3), k_D ; 透水係数(cm/sec)

γ ; 透過水の単位体積重量($g-f/cm^3$), μ ; 粘性係数(Poise)

つぎに、定圧脱水実験の場合、脱水による試料厚さの全減少量は単位排水面当りの搾液量($L_0 - L$)に等しいから、定圧脱水時に平均比抵抗 α_f と湿乾質量比 m が変化しないと仮定すると(7)式となる。ろ過期間終了時のケーキ厚を L_1 [cm]とすると(9)式が成立する。

$$(L_0 - L) + Lm = i [K (\theta_f + \theta_m)]^{1/2} \dots (7) \quad K = 2 g c P (1 - m_s) / \mu \rho_s \alpha_f \dots (8)$$

$$(L_0 - L_1) = (1 - m_s) w_0 / \rho_s \dots (9)$$

ここに、 i ; 排水面の数(—)(片面排水のとき $i = 1$)、 K ; Ruthの定圧ろ過定数(cm^2/sec), θ_f ; ろ過時間(sec)、 θ_m , Lm ; それぞれろ材抵抗に相当した仮想のろ過時間(sec)と仮想試料減少量[cm]、 m ; 生成ケーキの湿乾質量比(—)、 s ; 濃度分率(—)、 α_f ; 平均比抵抗(cm/g)

Terzaghi圧密理論は、圧密中試料の厚さを一定と仮定しているが、実際にはケーキが圧縮され空隙が減少するにつれケーキ内固体粒子は排水面に向かって移動しケーキの厚さは徐々に減少する。白戸¹⁾らは、単位面積の排水面から x [cm]までに堆積した乾燥固形物量 w_x (g/cm^2)をケーキ内の位置を表わす変数として用い、修正圧密係数 C_e ($(cm^2/sec) \cdot (g/cm^2)^2$)を一定としてTerzaghiと同形の圧密基礎式を用いた。

$$\frac{\partial e_w}{\partial t} = C_e \left(\frac{\partial^2 e_w}{\partial x^2} \right) \dots (10)$$

$$C_e = \frac{C_v \rho_s^2}{(1 + e_w)^2} \dots (11)$$

θ_c ; 圧密時間[sec]

e_w ; 位置 w_x における空隙比(—)

この C_e とTerzaghiの定義した圧密係数 C_v (cm^2/sec)とは(11)の関係にある。(10)式は(12)式の定義式を用い

表-2 定圧脱水実験の条件および結果

実験	初期含水率 w ₀ (%)	排水面圧力 P(g/cm ²)	移行点ケーキ厚 L ₁ (cm)	平衡点ケーキ厚 L ₂ (cm)	搾液量比 (L ₀ -L ₁)/(L ₀ -L ₂)	ろ過定数 (×10 ⁻⁵) (cm ² /sec)	修正圧密係数 C _e (×10 ⁻⁵) (g/cm ² ·sec)
A-1	95.67	713	0.740	0.233	0.713	1.02	0.382
A-2	94.05	758	0.800	0.318	0.713	1.06	0.762
A-3	92.41	742	0.873	0.415	0.711	0.839	1.15
A-4	90.97	741	0.929	0.482	0.706	0.783	1.34
B-1	95.65	1368	0.596	0.205	0.781	1.26	0.587
B-2	94.10	1405	0.688	0.265	0.756	1.20	0.829
B-3	92.36	1408	0.785	0.345	0.734	0.825	1.10
B-4	91.00	1397	0.829	0.396	0.730	0.657	1.32
C-1	95.60	2077	0.579	0.187	0.777	1.54	0.595
C-2	94.12	2073	0.636	0.240	0.773	1.16	0.994
C-3	92.30	2073	0.716	0.316	0.762	0.994	1.32
C-4	91.00	2077	0.772	0.356	0.747	0.773	1.16
C-5	88.65	2073	0.893	0.470	0.724	0.555	1.89

ると(13)式となり、初期条件、境界条件は(14)式となる。

$$\phi = \frac{e_w - e_2}{e_1(w_0/i) - e_2}, \omega = \frac{i w x}{w_0}, \tau_c = \frac{i^2 C_e \theta_c}{w_0^2} \dots (12)$$

$$(\partial \phi / \partial \tau_c) = (\partial^2 \phi / \partial \omega^2) \dots (13)$$

初期条件: $\tau_c = 0$ において $\phi = \phi_1(\omega)$

境界条件: $\tau_c = \infty$ において $\phi = 0$
 $\omega = 0$ および 2 において $\phi = 0$ } ... (14)

初期状態が一樣のまま圧密過程に入る場合、 $\phi_1(\omega) = 1$ を代入すれば圧密期間中の $\phi - \omega$ 分布と平均圧密度 U はそれぞれ(15)、(16)となり、また、圧密初期のケーキ内 $\phi_1(\omega)$ が正弦曲線すなわち $\sin(\pi \omega / 2)$ で近似できる場合にはそれぞれ(17)、(18)となる。 ... (15)

$$\phi = \sum_{N=1}^{\infty} \frac{4}{\pi(2N-1)} \sin\left(-\frac{(2N-1)\pi}{2}\omega\right) \exp\left(-\frac{(2N-1)^2\pi^2}{4}\tau_c\right)$$

$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{N=1}^{\infty} \frac{1}{(2N-1)^2} \exp\left(-\frac{(2N-1)^2\pi^2}{4}\tau_c\right) \dots (16)$$

$$\phi = \sin(\pi \omega / 2) \exp(-\pi^2 \tau_c / 4) \dots (17)$$

$$U = 1 - \exp(-\pi^2 \tau_c / 4) \dots (18)$$

また、実験的に C_e を求めるには実測曲線と理論曲線が相似であると、図-2 の関係から求められる。

5 実験結果および考察

5-1 圧縮ケーキの諸特性値

図-3 は、圧縮透過実験における各ケーキ圧縮圧力 P_s と平衡空隙率 n の関係である。 $P_s > 300$ (g-f/cm²) の範囲で n と P_s は片対数紙上で直線関係を示す。また、 $P_s \div 300$ (g-f/cm²) における空隙率は 0.88~0.90 で、この値は試料の液性限界値 ($n \div 0.89$) とほぼ一致する。ろ紙の抵抗 (2 枚) はろ紙の圧縮度が同一の場合一定値 (約 2×10^3 (1/cm)) をとる。荷重載荷前のろ紙と試料 ($L_0 = 3$ (cm)) の全抵抗

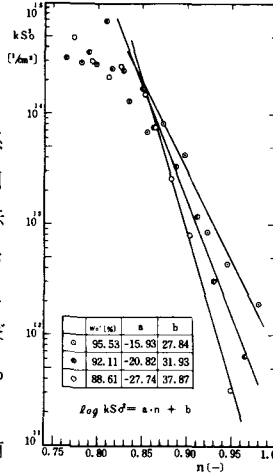


図-4 n と kS_0 の関係

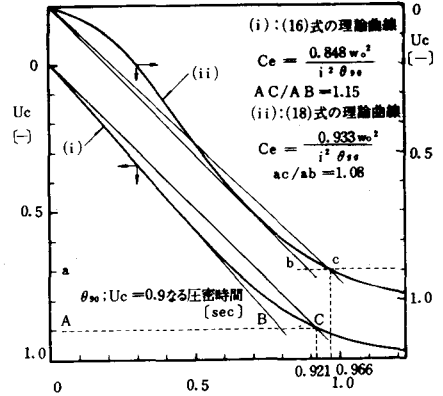


図-2 U_c と $\sqrt{\tau_c}$ の関係

ϕ ; 部分圧密度 (-)

ω ; 位置を示す変数 (-)

$e_1(w_0/i)$; 不透水面の間隙比 (-)

e_2 ; 圧密終了時の間隙比 (-)

τ_c 圧密時間係数 (-)

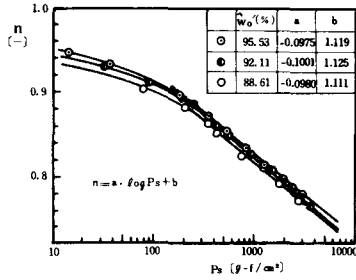


図-3 n と P_s の関係

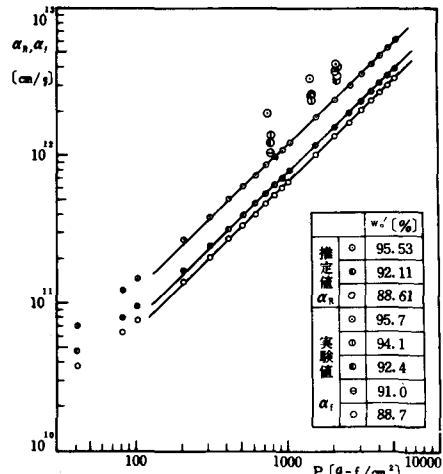


図-5 α_p , α_f と P の関係

は $2.3 \sim 2.9 \times 10^9$ [1/cm] であるから、ろ紙の抵抗は全抵抗の 9% 程度となる。したがって、圧縮圧力が小さい範囲では圧縮ケーキのみの抵抗はろ紙の抵抗を差し引いて求める必要がある。しかし、荷重載荷後の試料の抵抗は急激に増大するのでろ紙の抵抗は一般に無視できるほど小さい。図-4 に、 n と kSo^2 の関係を示した。 n が大きい範囲で n と kSo^2 は片対数紙上ではほぼ直線的に変化する。上水汚泥のように大きい空隙率をもつ試料に対し Kozeny-Carman 式が適用できるとすれば、試料の空隙率の減少によって kSo^2 の値は本実験の範囲で 2~3 オーダーほど増加する。ただし、空隙率が 0.8 付近での透水係数は 10^{-6} [cm/sec] 程度となるので kSo^2 の値には測定誤差が含まれる。図-5 に、(5) 式の積分値を求めて推定した平均比抵抗 α_R と定圧脱水実験による平均比抵抗 α_f を示した。推定値 α_f は初期含水率の低いほど同一圧力下で小さい値となり、実測値 α_f と同様の傾向にあるが、 α_R は α_f よりも小さい値を示した。この理由として定圧脱水時における排水面付近のケーキ層が脱水初期に急激に圧縮されこのケーキ層の抵抗が増大することが考えられる。

5-2 定圧脱水機構 図-6 に定圧脱水時の単位排水面積当りの搾液量 (L_o-L) と脱水時間 $\sqrt{\theta}$ の関係を示した。脱水初期に (L_o-L) と $\sqrt{\theta}$ は直線関係にあり、搾液量と時間が放物線関係にあることを示している。同図で (L_o-L) と $\sqrt{\theta}$ が直線関係を示す最終点を移行点とし、不透水面の液圧 P_x がほぼゼロになる点を平衡点としたときのケーキ厚をそれぞれ L_1 、 L_2 とし、搾液量比 $(L_o-L_1)/(L_o-L_2)$ とともに表-2 に示した。ただし、荷重載荷直後に起る汚泥の瞬間圧縮量および二次圧密量は考慮していない。搾液量比は初期含水率および脱水圧力が低いほど小さい値をとる。図-7 に、不透水面の液圧 P_x と脱水圧力 P との比 P_x/P と脱水時間の関係を示す。不透水面の液圧は移行点前脱水圧力に等しく一定値を示し、移行点よりわずかなにはやい時期に減少し始めゼロに近づく。図中の P_x/P の減少速度はケーキ厚などによって変化するので、 $P_x/P = 0.1$ なる時間を無次元時間 $\tau = 1.0$ として整理すると図-8 になる。 P_x/P は、初期含水率が一定のとき脱水圧力が低いほど、また、脱水圧力が一定のとき初期含水率が低いほどはやく減少し始め曲線の曲率もゆるやかである。

図-9 に、定圧脱水時のケーキ内含水分分布を、図-10 に、各搾液量における各ケーキ層の含水率変化を示す。図-10 で 0~0.5 mm 層における S 字の変曲点はほぼ移行点と一致する。図-11 に、脱水圧力一定時の 0~0.5 mm 層と 0.5~1.0 mm 層の初期含水率からの含水率低下を示した。0.5~1.0 mm 層の含水率低下は初期含水率が変化すると大きく異なるのに対し、0~0.5 mm 層の含水率低下はほぼ 1 つの曲線で表わすことができる。

試料に用いた上水汚泥は約 2 ケ月間自然沈降濃縮しているので、汚泥自体はすでに沈降曲線における圧密点に達していると考えられる。そこで、初期状態様の圧密理論を用いて考察を進める。図-9 の含水率分布を定義式により $\phi-\omega$ 分布に変換する。

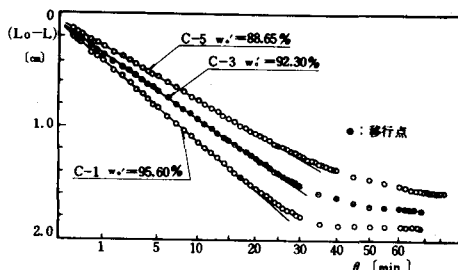


図-6 (L_o-L) と θ の関係 (時間軸スケール $\sqrt{\theta}$)

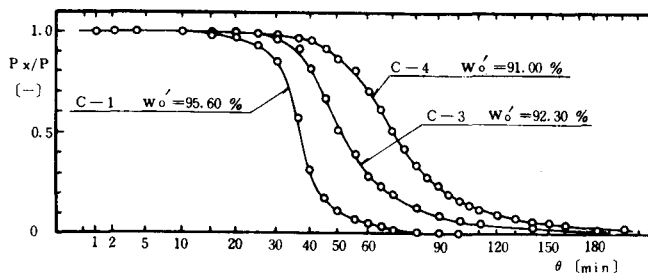


図-7 不透水面の P_x/P と θ の関係 (時間軸スケール $\sqrt{\theta}$)

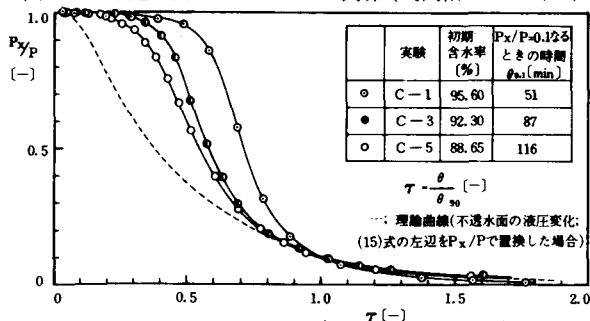


図-8 不透水面の P_x/P と τ の関係

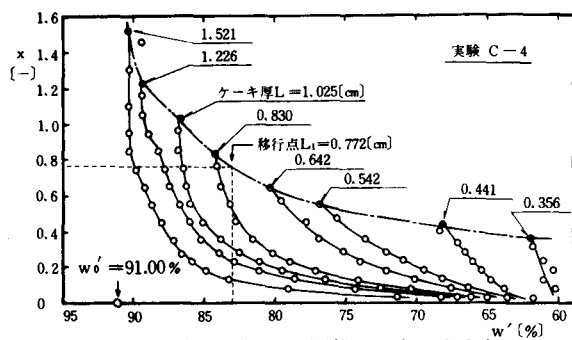


図-9 排水面からの距離 x と含水率分布

このとき、 e_2 は図-3の結果を用いて定めた。この $\phi-\omega$ 分布の一例を図-12に示す。図中の τ_c の値と実測の脱水時間を用い定義式より実験値 C_e を求めて図-13に示した。ただし、試料の初期含水率が高い場合には、実測値と理論曲線との適合性は小さくなる。実験値 C_e は脱水圧力によってさほど変化せず、試料の初期含水率に対して大きく変化する。この実験値 C_e を用いて理論曲線を推定し図-14に示した。本実験の場合には、表-2に示したように平均圧密度(搾液量比)が約0.7~0.8になるま

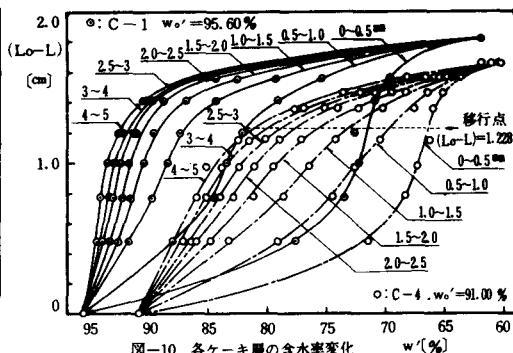


図-10 各ケーキ層の含水率変化 $w'(\%)$

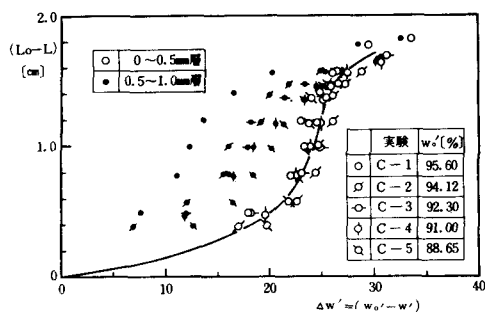


図-11 初期含水率からの含水率低下

で圧密時間 $\sqrt{t_c}$ と平均圧密度は直線関係にあり、図-2で示した理論曲線の0.6と異なる。 $\phi-\omega$ 分布も初期含水率が高くなるほど理論曲線からずれてくる。したがって、図-14の実験値と理論曲線とのずれを二次圧密量として補正するには疑問が残る。そこで、移行点前をろ過期間、移行点後を圧密期間として考察を進める。ろ過期間は排液量 (L_0-L) とろ過期間 $\sqrt{t_f}$ が直線関係を示す期間であり、この直線の傾きより、Ruthの定圧ろ過定数Kが求まる。各条件のKを表-2に示した。圧密期間の初期条件は次の手順で定めた。まず、

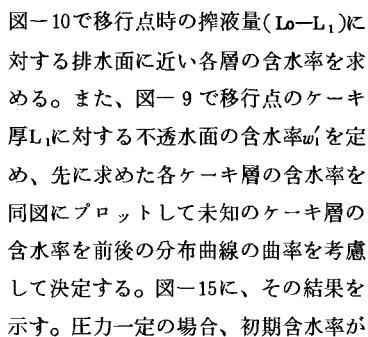


図-12 $\phi-\omega$ 分布の一例 ($\phi_1(\omega)=1$)

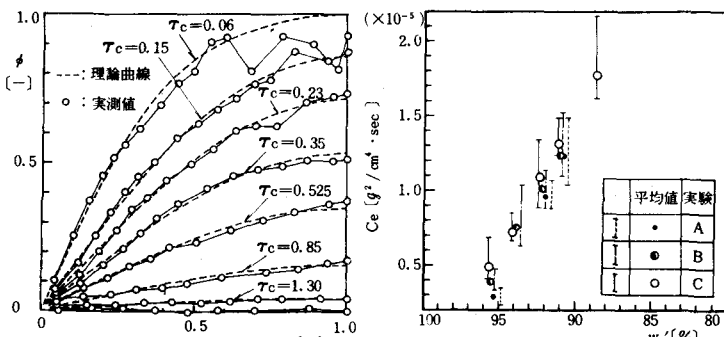


図-13 Ce の実験値

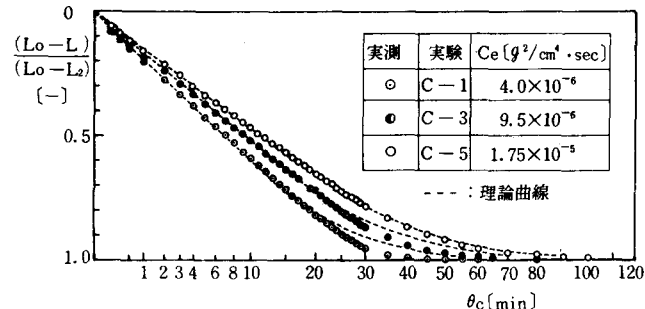


図-14 $(L_0 - L) / (L_0 - L_2)$ と θ_c (時間軸スケール $\sqrt{\theta_c}$)

キ内液圧分布を図-3の結果と(3)式の関係を用いて求めたものである。白戸らは、中程度の圧縮性をもつ汚泥の移行点時の液圧分布は図中の正弦曲線で近似できるとした。しかし、上

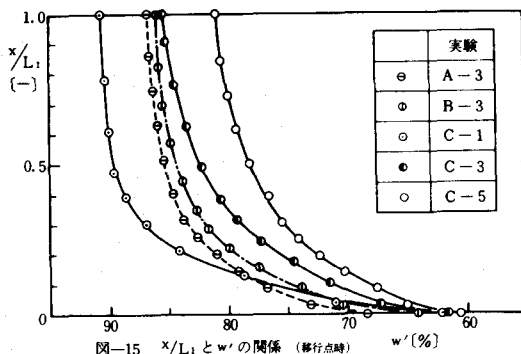


図-15 x/L_1 と w' の関係 (移行点時)

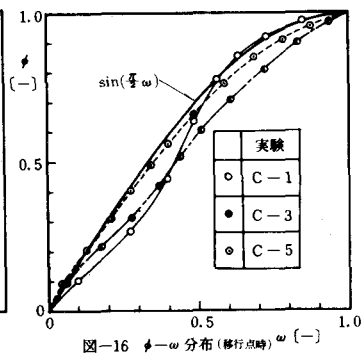


図-16 $\phi-\omega$ 分布 (移行点時) ω (-)

水汚泥のような高圧縮性の汚泥では排水面付近における圧力損失が大きく正弦曲線では近似できない。図-18は、圧密期間中の $\phi-\omega$ 分布の一例で、実測値と理論曲線とはほぼ一致する。しかし、初期含水率あるいは圧密圧力が高いほど実測値と理論曲線との適合性は悪くなる傾向にある。図-19に、図-2の関係を用いて求めた C_e の実験値 (表-2) による理論曲線と実測値を示した。理論曲線と実測値は圧密初期の $\phi-\omega$ 分布が正弦曲線に近似できる試料ほど適合性がよい。また、ここで求めた実験値 C_e は図-13で示した値にはほぼ等しい。

以上、 C_e が圧密期間中一定とした圧密理論によって解析を進めてきたが、一般に C_e は位置と時間の関数であり一定ではない。特に、ケーキ内での濃度分布に大きな差がある場合には、 C_e 一定とした圧密理論では不十分であろう。

6. おわりに

圧縮透過実験と定圧脱水中単位排水面積当りの固形物量が一定の脱水実験の結果をまとめるとつぎのようになる。

- 1) 定圧脱水の際、搾液量比は 0.7 ~ 0.8 の範囲にあり、初期含水率、脱水圧力が低いほど小さい値をとる。
- 2) 排水面付近の層は、脱水圧力固有の含水率低下 ($w'_0 - w'$) を生じる。
- 3) 移行点時の $\phi-\omega$ 分布は、ほぼ正弦曲線で近似できる。
- 4) 移行点後の圧密過程は(10)式で定義される圧密理論ではほぼ近似できる。

最後に、本研究に協力して下さった (現福島県庁) 鈴木武男君に心から感謝致します。

参考文献

- 1) 白戸、村瀬; 圧搾操作、化学工学、34-6、34-7、(1970)
- 2) 土質試験法、(1969)
- 3) 梅原、善; 超軟弱粘土の圧密定数の決定法、港湾技術研究所報告、14-4、(1975)
- 4) 佐藤、後藤; 上水汚泥の定圧脱水過程に関する実験的考察、第30回全国水道研究発表会、昭54.5
- 5) 川島; 加圧ろ過機の脱水機構の考察、水処理技術、vol.13-1(1972)、vol.17-2(1976)

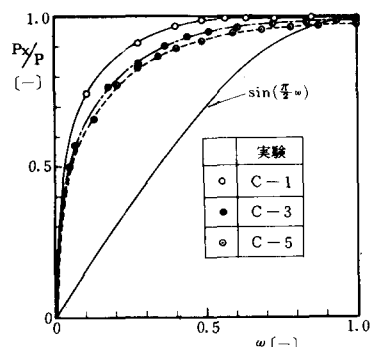


図-17 $P/P_0-\omega$ 分布 (移行点時)

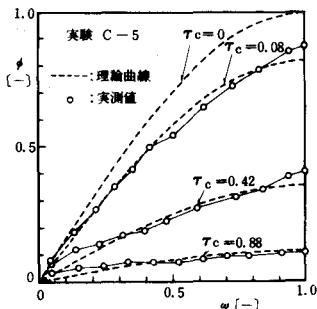


図-18 $\phi-\omega$ 分布の一例 ($\phi(\omega) = \sin(\pi\omega/2)$)

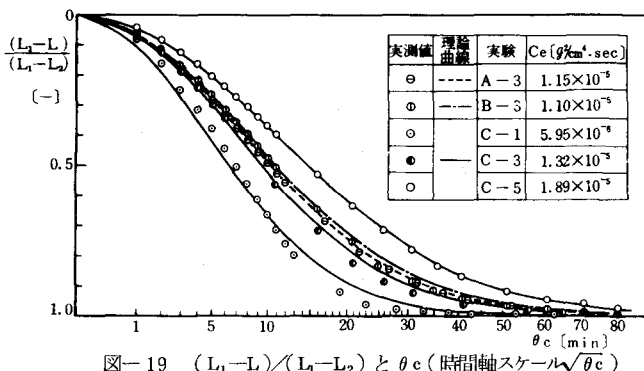


図-19 $(L_1-L)/(L_1-L_2)$ と θc (時間軸スケール $\sqrt{\theta c}$)