

九州大学 工学部 正 員 楠田哲也
 “ “ “ 栗谷陽一
 “ “ “ 古賀憲一

I. まえがき

汚泥の処理が問題となっているが、汚泥の圧縮沈降の解析は、Kynchにより提案された $\partial c/\partial t + V(\partial c/\partial x) = 0$ 型の線形偏微分方程式にとどまっております、この沈降現象は未だ明確にされていません。圧縮沈降に際しては、非線形要素である汚泥に作用する有効応力と無視できないが、Kynchの考え方にはこの概念が含まれていません。本研究は汚泥の圧縮沈降の解析に有効応力を考慮した上で、この沈降現象を正確に把握し、これをもとにして、シッファナーの設計法および圧縮沈降速度、沈降後の汚泥密度の増加法等について検討しようとするものである。本報においては、第1段階として、有効応力を含んだ圧縮沈降の式をもとにして実験により有効応力および透水係数を求め、これらを用いて数値計算により有効応力の有無が界面沈降速度に及ぼす影響を考察した。

II. 基本式

基本式を導くにあたり以下の如く仮定する。(1) 汚泥は均一である。(2) 汚泥および水の圧縮量は無視できる。(3) 汚泥の間隙は水で完全に飽和されている。(4) 汚泥中の水の排出は一軸的に行われ、Darcyの法則を満足する。(5) 汚泥の圧縮も一軸的である。これらの仮定により基本式は次の如く求められる。

$$-\frac{\partial P_s}{\partial x} + \frac{\mu}{K} \left(V_L - \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} V_s \right) - (p_a - p_e) g = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial x} + \frac{\partial P_e}{\partial x} + (p_a - p_e) g = 0 \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right)_x - \frac{\partial V_s}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$V_L + V_s = g \quad (4)$$

ここで、 ε : 汚泥の空隙率、 V_L, V_s : 流体および汚泥の空塔速度、 p_e, p_s : 流体および汚泥の密度、 p_a : 汚泥の流体中での見かけ密度で、 $(p_a - p_e) = (1-\varepsilon)(p_s - p_e)$ 、 K : 透水係数、 μ : 粘性係数、 P_e : 静水圧と差引いた水圧、 P_s : 汚泥の有効応力、 g : 混相流としての空塔速度、 g : 重力の加速度である。数値計算を容易にするために、座標系を (x, t) から (ω, t) に変換すると次式となる。ただし、 $\omega = \int_0^x (1-\varepsilon) p_s dx$ である。

$$-(1-\varepsilon) p_s \frac{\partial P_s}{\partial \omega} + \frac{\mu}{K} \left(V_L - \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} V_s \right) - (p_a - p_e) g = 0 \quad (1')$$

$$p_s \frac{\partial P_s}{\partial \omega} + p_s \frac{\partial P_e}{\partial \omega} + (p_s - p_e) g = 0 \quad (2')$$

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right)_\omega + (1-\varepsilon)^2 p_s \frac{\partial}{\partial \omega} \left(V_L - \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} V_s \right) = 0 \quad (3')$$

(4)は変化しない。(1),(2)あるいは(1'),(2')は固相および全体の運動方程式に相当する。(3)あるいは(3')と(4)は固相および全体の連続の式である。

III. 実験装置および方法

充分水質した筑豊カオリン ($p_s = 2.61 \text{ g/cm}^3$) を管内水道水に濁度 2000ppm になるように混和し、バンド 20 ppm、セパラン NP-10 2ppm を加えてフロックを作り、図-1 に示す内径 10 cm ϕ のパイプにこのフロックをジャーテスタから直接注入してアランケットを作った。アランケットの各高さにおける汚泥乾燥重量および汚泥密度を求めることにより (2) から $P_s + P_e$ を求めることができ、さらに P_e は図-1 に示すマンメータにより求めることができ、結局 P_s を求めることができる。これらを用いると (1) から K を求めることができる。本実験では上向流を与え、

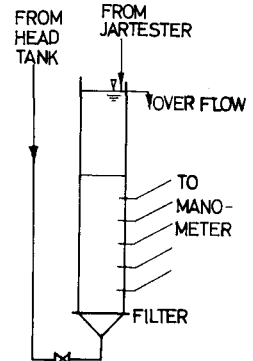


Fig-1 APPARATUS

$V_s=0$ とし, $V_e=\varepsilon$ とした。 $\varepsilon=0$ として V_e を消去し, 汚泥各粒子の沈降速度からでも K を求めることができる。

Ⅵ. 実験結果

上向流を与えてフロックを流動化させ濃度を鉛直方向に均一化させた後, 空塔速度を 0 にした場合の界面の移動曲線の 2 例を図-4 に示す。空塔速度は両者とも 0.44 cm/s である。原点を 0 として, $\partial B/\partial B$, $\partial C'/\partial C$ 等の値を求め図中に記入している。Kynch の考え方に従えばこの比の値は一定でなければならぬが, 実際にはフランクセット中の総汚泥重量の多い方が沈降が早い。このことは有効応力の無視できないことを示している。一方, 流動化開始速度以下の種々の空塔速度においてフランクセット界面が静止した時の水圧およびこのときの汚泥の各層の乾燥重量から求めた P_s と ε の関係を図-2 に示す。 P_s は ε の減少と共に急激に増加するはずであるが, ε は 1 に近いとして, P_s' と ε の関係を一次式で近似すると, $\varepsilon=0.965$ を流動化開始空塔率として, $\varepsilon \leq 0.965$ で $P_s' = -12.5(\varepsilon - 0.965)$, $1 > \varepsilon > 0.965$ で $P_s' = 0$ となる。Kozény 式により表現しようとしたときの透水係数 K を図-3 に示す。この場合,

$$K = \frac{2.5}{10^3 P_s g} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (5)$$

となる。上向流を与え $V_s=0$ とする方法で K を求めるとき, ε が小さくなると channel を生じ, 実験が困難となるので他の方法が検討されなければならぬ。

Ⅶ. 数値計算

境界条件を容易に満足させるため計算は(4)を用いて V_e を消去した(1')と(3')を用いた。そして $\partial P_s/\partial \varepsilon = \frac{dP_s}{d\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial \omega}$ とした。結果を図-4 に示す。図中の ε_d は、原点から B 点へ上昇していく濃度境界面直下の汚泥の空隙率, ε_c は $P_s=0$ とした場合の最低空隙率である。 ε_c は本実験において二昼夜静置したフランクセットの最小空隙率である。これらの結果から有効応力が作用していないとした場合の沈降界面の移動は、そうではない場合とはかなり異なり, 有効応力の作用がかなり効いていることが解る。原点から B 点への濃度境界面の移動曲線は実験では凸に曲がり, 直線にはならない。これは, 粒度分布等の影響と考えられる。

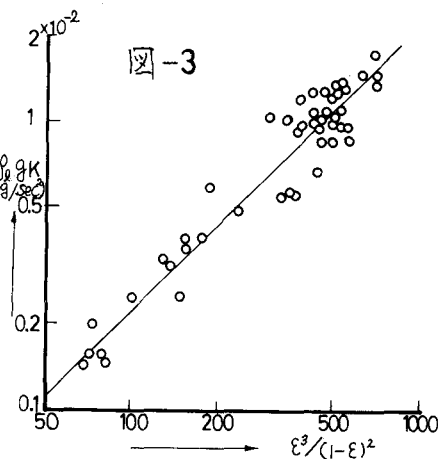
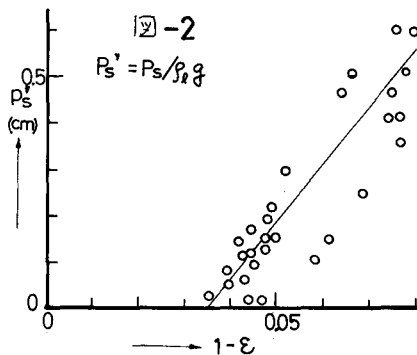
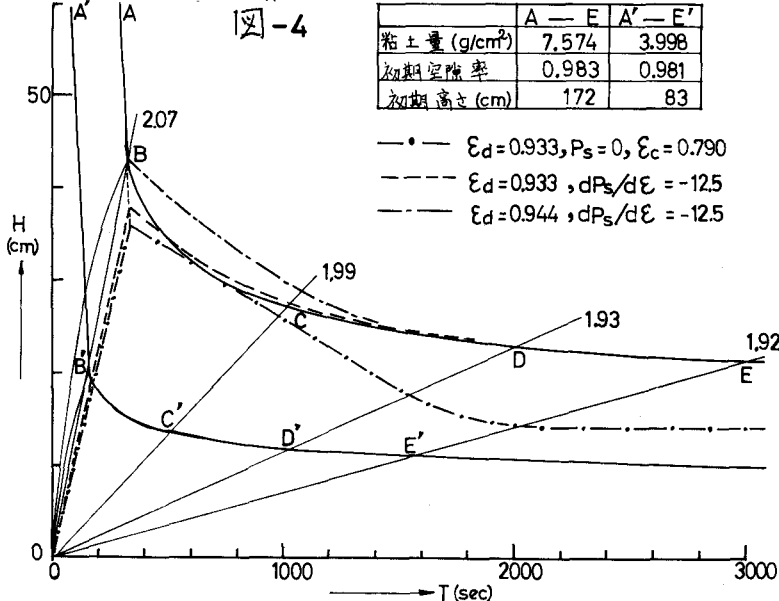


図-4



	A—E	A'—E'
粘土量 (g/cm²)	7.574	3.998
初期空隙率	0.983	0.981
初期高さ (cm)	172	83

—•— $\varepsilon_d=0.933, P_s=0, \varepsilon_c=0.790$
 - - - $\varepsilon_d=0.933, dP_s/d\varepsilon = -12.5$
 - - - $\varepsilon_d=0.944, dP_s/d\varepsilon = -12.5$

参考文献

Kynch: G. J., "A Theory of Sedimentation," Trans. Faraday Soc. Vol. 29, 1933, 166-176