

粘土懸濁液のフロックの性質について

立命館大学理工学部
神戸市立工業高等専門学校正員 大同 淳之
正員 〇日下部重幸

1. はしがき

粒子懸濁液のフロックは、下水や汚水処理等に際して重要な働きをするので、フロックの沈降速度等についても、多数の理論式や実験式が提唱されている。これらの式は、比較的濃度の低いものを主な対象としているが、粘土を多量に含んだ泥流についても、フロックの性質を調べることで、泥流の一部の特性を表し得るものと考えられる。

粘土懸濁液は、図-1のように、フロックや集団を形成し流動や沈降に際して複雑な挙動を示す。

沈降特性の実験では、フロック面の挙動を扱ったものが多いが、A. M. Gaudin と M. C. Fuestenau が X 線を用いて懸濁液中の密度分布を測定した結果が、A. S. Michaels らにより紹介されている¹⁾。これによると、ある深さまでは最初の濃度が棒状に保たれて沈降し、下部から破壊が進んで密度の高い部分が時間の経過とともに上昇するとしている。

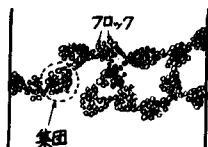


図-1. フロックおよび集団の構造モデル

2. 圧縮沈降速度

懸濁液の圧縮沈降速度式として、Roberts 式と Rollason 式²⁾の特性を生かし、カオリン凝集スラリーや河川濁質スラリーに対して広範に適用できる次の式が穂積により導かれている³⁾。

$$\ln \frac{Z-Z_f}{Z_c-Z_f} = n \cdot \ln \frac{t}{t_c} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 Z は時間 t におけるフロック面の高さ、 Z_f は無限時間経過後の高さ、 Z_c は圧縮点 $t=t_c$ における高さ、 n は定数である。式(1)は、 $(Z-Z_f)$ と t とが両対数紙上で直線となることを示している。

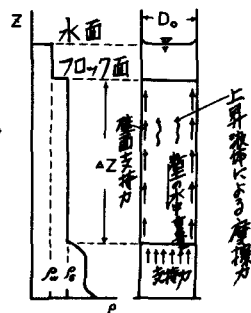
Terzaghi の一次元圧密理論によると、間げき水圧 u は、圧密係数 C_v を用いて、 $\partial u / \partial t = C_v \cdot \partial^2 u / \partial z^2$ ----- (2) と表される。式(2)を片面排水系、間げき水圧の初期値 u_0 が全層を通じて一定という条件で解き、粘土層の初期高さ Z_0 、平均圧密度 $U = (Z_0 - Z) / (Z_0 - Z_f)$ を用いて書くと次のようになる³⁾。

$$1 - U = \frac{Z - Z_f}{Z_0 - Z_f} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \exp \left[-\frac{\pi^2 (2m+1)^2 C_v t}{4 Z_0^2} \right] \quad \text{----- (3)}$$

式(3)は、 $(Z-Z_f)$ と t が片対数紙上で直線となることを示している。

A. M. Michaels と J. C. Bolger は、図-2 のような初期濃度が一定に保たれる長さ ΔZ を考え、フリ合式をたて、Kozeny-Carman の式 $dp/dz = k_0 \mu L_p^2 \cdot dz/dt \cdot S^2 / e^3$ ----- (4) を用い、壁面支持力を無視して次式を導いている⁴⁾。

$$\frac{dz}{dt} = \frac{e^3}{k_0 \mu L_p^2 S^2} \left\{ -\frac{\sigma_y}{\Delta Z} + g(p_s - p_w) \phi_s \right\} \quad \text{----- (5)}$$

図-2 一定濃度部に
かかる力

ここに、 e は空けき率、 S は比表面積、 μ は液体の粘性係数、 ϕ_s は集団の圧縮降伏値、 ρ_s は粒子および水の密度、 ϕ_s は容積濃度、 k_0 、 L_p は滑らかな直管に対して2.0、1.0の値をとることができる。

3. フロック径

比表面積 S と開けき平均直径 d_0 の関係 $S = 4e/d_0$ 、 $k_0 = 2.0$ 、 $L_p = 1.0$ として式(4)を変形すると

$$d_0 = \sqrt{\frac{32\mu \frac{dz}{dt}}{e \cdot \frac{d^2z}{dt^2}}} \quad \text{----- (6)}$$

となる。また e は、集団の容積濃度 ϕ_A 、フロックの容積濃度と粒子の容積濃度との比例係数 C_{FS} 、集団の容積濃度とフロックの容積濃度との比例係数 C_{AF} を用いて、

$$e = 1 - \phi_A = 1 - C_{AF} \phi_F = 1 - C_{AF} \cdot C_{FS} \cdot \phi_s \quad \text{----- (7)}$$

と表すことができ、フロックが球形で正方形の粗充填を

すると仮定すると、 $C_{FS} = 0.52 \cdot Z_f / Z_0 \phi_s$ ----- (8) と表すことができる。さらに、フロック径 D_A は、 $D_A = 1.284 d_0$ ----- (9) となる。

4. 実験および結果

実験装置は、内径6.2cm、長さ200cmの透明アクリルパイプを鉛直に立て、30cm間隔に開けき水圧測定用ピエゾメーターを取付けたものである。実験に用いた粘土は、中央粒径 $d_{50} = 0.0034$ mm、比重2.70、標準偏差2.96の白色粘土である。

懸濁液柱の高さ180cm、容積濃度 $\phi_s = 0.068 \sim 0.207$ で実験を行ったが、フロック面は数十時間の間ほぼ直線的に低下し、一定の高さで沈降がほぼ停止した。停止したフロック面の高さを式(1)、(3)の Z_f に等しいものとして、 $(Z - Z_f)$ と t との関係を図示すると、図-3のように、片対数紙上でほぼ直線となり式(3)に近い形で沈降するものと考えられる。この場合、Terzaghi理論の多くの仮定が粘土懸濁液の沈降にもある程度許されることとなるが、これは、圧密作用を受ける部分が、棒状の初期濃度部と底面から上昇する高濃度部の接するごく狭い範囲で行われるためと考えられる。

式(8)を変形し、 $Z_f = C_{FS} \cdot \phi_s \cdot Z_0 / 0.52$ ----- (10) とすると、 Z_f と $\phi_s Z_0$ とは比例することとなる。実験結果を図示すると、図-4のようになり $C_{FS} = 1.9$ 程度の値が得られた。

初期濃度が棒状に低下することが、実験開始より6~7時間について読みとれたので、この間の結果を用いてフロックを球形として D_A を求めると、図-5に示すようである。これよりフロック径は、粘土粒子径の2.88~9.0倍程度の値であることが推定される。参考文献

1) 4) A.S. Michaels & J.C. Bolger; Settling Rates and Sediment Volumes of Flocculated Kaolin Suspensions, J. E.C. Fundamentals, 1962
2) 穂積 肇; 凝集性スライの圧縮沈降特性に関する研究(1), 水道協会雑誌第514号, 1977. 3) 長江 義一; 粘土沈降特性, 工費工学, 1969

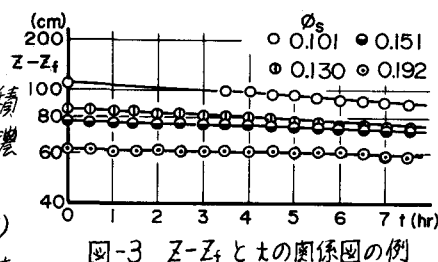


図-3 $Z - Z_f$ と t の関係図の例

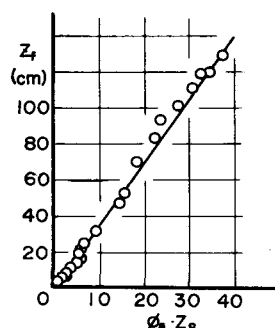


図-4 Z_f と $\phi_s Z_0$ の関係

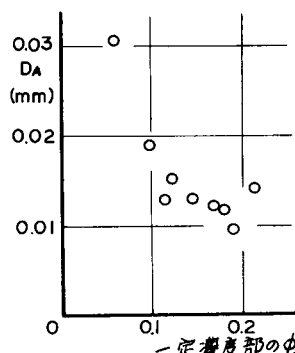


図-5 D_A と ϕ_s の関係