

九州大学工学部 学生員 石原達弘 正 員 海田輝之 学生員 則松秀晴
正 員 柳田哲也 正 員 栗谷陽一

1 はじめに 凝集性を有するシルト及び粘土の流水下に於ける沈降は、老朽、河口感潮部での堆積やデルタの形成等の地形変化の問題や河川の河道の維持や水の懸濁といった問題に大きな影響を与えている。さらに有害物質を吸着し遷移することによる水域の汚染が考えられる。しかしながら沈降の機構は、沈降粒子の物性、水温、水中の塩分濃度の相異等により、複雑となりその解明には至っていないのが現状である。以上の様な観点から、本研究では、底泥の沈降特性の解明を試みた。さらに沈降過程を表す式を導き、その式の適用性の検証を行った。

2 実験装置及び方法 実験に用いた回転円形水路の概略を図-1に示す。この様な水路では遠心力による半径方向の二次流が生じるが、本研究では水路とリングを逆方向に回転させることにより、二次流の影響が底面付近で最小になる様な水路とリングの回転速度の操作範囲をあらかじめ定め、これを用いて回転数を調整する。実験は所定の濃度の粘土懸濁液を十分に攪拌した後、所定の剪断応力の下で行った。尚、今回の実験では、比重1.25の塩水(塩水を使用)を用い、水深を15cmに保った。実験時の水深基準レイノルズ数は、 $(2 \sim 8) \times 10^4$ であった。試料として、筑後川河口で採取した底泥を用いた。この試料の物性値は、比重2.65、平均径 $48 \mu\text{m}$ 、塑性限界11.8%、塑性限界50%、乾燥減量10.3%である。またJIS A1204による粒度分布を図-2に示す。尚、実験中における試料の物性変化を防ぐ為、全ての実験は恒温室内で行い、水温を $20.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ に保った。サンプリングは、水面下7cmの所で行った。SSの測定には孔径 $0.1 \mu\text{m}$ のメンブレンフィルターを使用した。サンプルの粒度分布は顕微鏡写真をプロジェ

クターで拡大し、体積粒度分布として求めた。

3 実験結果及び考察 図-3に、剪断応力が 0.05 N/m^2 の下で初期濃度を変化させて行った沈降実験の結果を示している。初期濃度 C_0 が 2 g/L 以下では、沈降曲線はほとんど同一になるのに対し、 $C_0 = 4 \text{ g/L}$ 以上では、沈降が遅くなる。これは試料に凝集性があり、干渉沈降が起ったためであると思われる。よって本研究では $C_0 = 2 \text{ g/L}$ 以下の場合を対象とする。図-4は、 $C_0 = 2 \text{ g/L}$ で7段階の剪断応力の下での沈降状態にあるSS濃度 C の経時変化を示したものである。 C は時間の経過と共に減少している。またその減少率も時間と共に小さくなり最終的には C は、ほぼ一定値 C_d に落ち着いている。また図-5は、図-4から得た C/C_0 と τ の関係を示したものである。実用上、急激に C/C_0 の値が減少するところの剪断応力の外挿値を沈降可能な全ての粒子が沈降する限界の掃流力(全沈降限界掃流力) τ_d とすれば、本研究で用いた底泥の τ_d は 0.025 N/m^2 となる。さらに、実用の為に無次元濃度と無次元掃流力

$$\frac{\tau - \tau_d}{\tau_d (\% = 0.5) - \tau_d}$$

($\tau_d (\% = 0.5)$ は C/C_0 が 0.5 の時)

との関係を既に求められている数種の底泥及び今回の試料について示したものが図-6である。この図より、底泥の種類に関係なく一本の曲線上にのることがわかる。

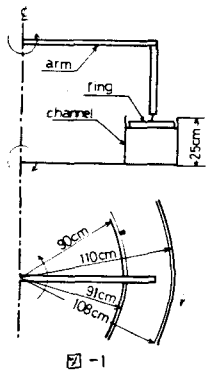


図-1

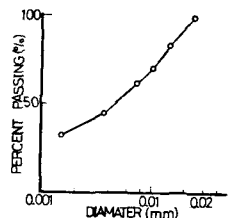


図-2

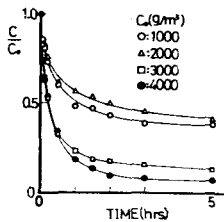


図-3

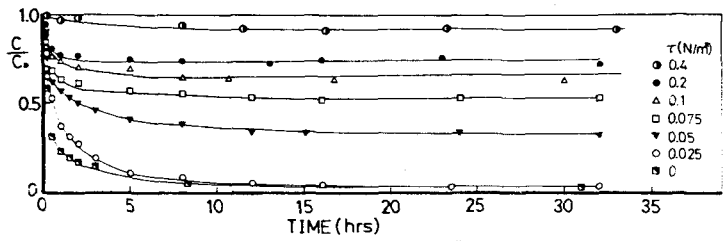


図-4

即ち、剪断応力を変えた幾つかの trial-tests から、 $\frac{C_0}{C_\infty} = 0.5$ になる剪断応力 τ と d_c を知ると、他の場合の $\frac{C_0}{C_\infty}$ が推定できることになる。ここで、一定剪断応力下での底泥の沈降過程を表す式を求める。水路主流部は拡散・混合が充分に行われる為、鉛直方向濃度分布は検出されなかった。物質保存式は、

$$H \frac{\partial \bar{C}(d)}{\partial t} + V(d) C|_{z=0} = 0 \quad (1)$$

となる。ここで、 H ：水深、 $\bar{C}$ ：水深方向平均濃度、 d ：粒径、 V ：沈降速度である。式(1)の左辺第2項の $V C|_{z=0}$ の代りに近似的に $\bar{V} \bar{C}$ が使えるものとし、さらに $V \sim \alpha d^m$ (2) とおく

ここで $m=1$ かつ 2 で、 $m=1$ の時 $[\alpha] = T^{-1}$ 、 $m=2$ の時 $[\alpha] = L^{-1} T^{-1}$ の次元を持つ。剪断応力が全ての底泥が沈降する限界掃流力 τ_c より大きいと上述した様に粒子群の一部が水中に浮遊したまま保たれることになる。そこで、ある剪断応力に対応してある粒径 d_c が存在し、 $d < d_c$ となる粒子は沈降せず、さらに $d \geq d_c$ の粒子においても沈降粒子の沈降速度が減少すると考えられる。つまり、 $V = \alpha(d - d_c^n)$ (3) とおくと

結局(1)式は

$$\frac{\partial \bar{C}(d)}{\partial t} + \frac{\alpha}{H} (d^n - d_c^n) \bar{C} = 0 \quad d \geq d_c \quad (4-1)$$

$$\frac{\partial \bar{C}(d)}{\partial t} = 0 \quad d < d_c \quad (4-2)$$

となる。初期条件として $t=0$ で、 $\bar{C} = \bar{C}(d, 0)$ とすれば(4)式は $\bar{C} = \bar{C}(d, 0) \exp\{-\frac{\alpha}{H} (d^n - d_c^n) t\}$ $d \geq d_c$ (5-1) $\bar{C} = \bar{C}(d, 0)$ $d < d_c$ (5-2) となる。ここで、全体としての濃度 C を考えると、

$$C = \int_0^\infty \bar{C} \alpha d = \int_0^{d_c} \bar{C} \alpha d + \int_{d_c}^\infty \bar{C} \alpha d$$

$$= C_0 + \int_{d_c}^\infty \bar{C}(d, 0) \exp\{-\frac{\alpha}{H} (d^n - d_c^n) t\} \alpha d \quad (6)$$

となる。本実験で用いた粘性土では、図-7に示した様に粘土粒子の累加体積は d に比例している。従って体積分布は一様分布となる。よって、 $\bar{C}(d, 0)$ として

$$\bar{C}(d, 0) = \beta \quad (7) \text{ として}$$

初期最大粒子の粒径を d_s 、又粒子の沈降速度は、Stokes の式によるとして、 $m=2$ におくと

$$C = C_0 + \int_{d_c}^{d_s} \beta \exp\{-\frac{\alpha}{H} (d^2 - d_c^2) t\} \alpha d \quad (8)$$

また

$$C_0 = \beta d_s, \quad C_\infty = \beta d_c \quad (9)$$

(4)式を(8)式に代入し、整理すると

$$C = C_\infty + \frac{C_0}{\sqrt{\pi H}} e^{\frac{\alpha}{H} d_c^2 t} \left[\phi\left(\sqrt{\frac{\alpha}{H}} d_s\right) - \phi\left(\sqrt{\frac{\alpha}{H}} d_c\right) \right] \quad (10)$$

$$\text{但し } \phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

$$\text{無次元化時間として } \tau = \frac{\alpha d_c^2}{H} t \quad (11)$$

を導入し、(11)式を用いて(10)式を再整理すると

$$\frac{C - C_\infty}{C_0 - C_\infty} = \frac{1}{1 - C_0/C_\infty} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{\tau}} e^{\frac{\tau}{2} \left(\frac{C_0}{C_\infty}\right)^2} \left[\phi\left(\sqrt{\tau}\right) - \phi\left(\frac{C_0}{C_\infty} \sqrt{\tau}\right) \right] \quad (12)$$

となる。

(12)式の計算結果を、 $\frac{C - C_\infty}{C_0 - C_\infty} = 1 - e^{-\tau}$ となる濃度を示す時間を基準時間として、沈降時間を無次元化し、しかも $\frac{C_0}{C_\infty}$ をパラメータとして表示したのが図-8中の実線である。同図中のデータは、図-4のデータを同様の無次元化時間を用いて表示したものである。実験値と理論値とは良く対応している。従って、粒度分布の中の広い自然の粘土の場合に、(12)式を仮定しても差しつかえないことがわかる。実用上は、幾つかの trial-tests から図-5を用いて $\frac{C_0}{C_\infty}$ の予測が可能であり、また沈降に関する無次元化時間がわかれば、図-8を用いて、沈降フラックスの予測も可能となる。無次元化時間の予測については、今後、検討を続けていく予定である。

本研究は、55年度文部省科学研費 一般研究(C)の補助を受けて、行ったものである。

(参考文献)

1. 海田、楠田、栗谷：
底泥の巻き上げと沈降に
関する基礎的研究
第17回衛生工学シンポジ
ウム概要集、1981/1.

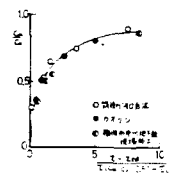
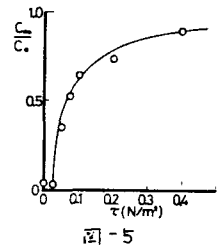


図-6

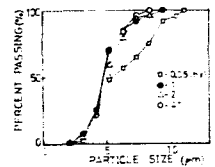


図-7

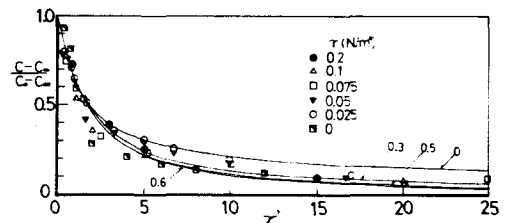


図-8