

## 1. はじめに

本研究の目的は、比較的含水比の高い底泥の巻き上げ過程及び巻き上げ量の手算を可能とすることである。

## 2. 実験装置及び方法

本研究では試料として筑後川河口部で採

取した底泥を用いた。比重1.025の塩水で試料の含水比を380%に調整した後、長さ1200cm、中28cmのアクリル製直線水路の下流端から200～600cmの部分に位置する深さ3.8cmの凹部にセットした。実験は、底面剪断応力を3種類に変え、水温22～25℃、比重1.025の塩水を流すことにより行った。底泥の移動量の測定は、通水前、水性白色顔料の具で灰白に着色した試料（含水比は同じ）を流れ方向と垂直に4cmの中で底泥中にセットし、通水後、図-1に示した装置を用いて水路床に残存した試料を抜き出して写真撮影から求めた。

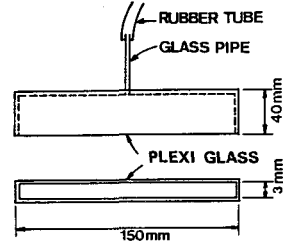


図-1 底泥の移動量測定用装置

## 3. 実験結果と考察

3種類の剪断応力(τ)の下での巻き上げ量の時間変化を図-2に示す。底泥は実験開始後数分間で急速に巻き上げられ、その後緩やかな巻き上げが続く。最終的に巻き上げも次第に起こらない一定な状態となる。図-3はτ=0における巻き上げ速度と $(\tau - \tau_c)/\tau_c$ の関係を示したものである。ここでτは巻き上げの限界剪断応力で、本試料の場合0.187 N/m<sup>2</sup>であった。この関係は以下の式で表わすことができる。

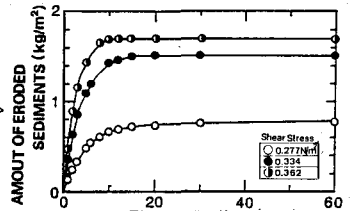


図-2 巻き上げ量の経時変化

$$E_{t=0} = 0.00917 \left( \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right)^{1.0} \quad (\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}) \quad (1)$$

通水1時間後に巻き上げられずに水路床に残存した底泥の固体分率を示したのが図-4であり、図中の縦線はτ=0における固体分率の鉛直分布を表わしている。固体分率は表層部から徐々に減少し、その後漸次増加している。この下層部の固体分率の増加は、主に圧密によると考えられる。また、剪断応力の増加につれて表面の固体分率が大きくなっている。表層近くにおける固体分率の増加の機構を調べるため、底泥の水平移動量の鉛直分布を測定した。写真-1,2は、剪断応力0.277及び0.364 N/m<sup>2</sup>の下で通水開始後6分での移動量を示している。写真から表面近くの底泥が相当量移動し、剪断応力の増加に伴って底泥が移動する厚さが深くなり、移動量の鉛直勾配も大きくなることから認められる。以上より、底泥の水平方向移動量が下層部ほど小さくなり、底面近くでは移動しないことから、底泥の水平移動に対して下層部ほど大きな何らかの抗力が働いている事が解る。また、表層付近の底泥がかなり移動することから、この底泥の流動が固体分率の増加に何らかの影響を与えていると考えられる。

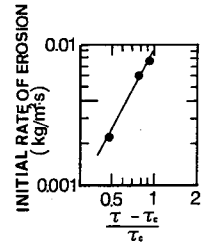


図-3 剪断応力と初期巻き上げ速度の関係

以上の実験結果及び考察から、巻き上げ速度が通水開始後数分で減小する理由を以下で考えてみる。底泥中には重力と水平方向の移動に対する抗力が働く。剪断応力が限界剪断応力以上になると巻き上げを生じるが、表層部の方が水平移動に対する抗力が小さいため移動速度が大きく、その速度勾配により表層部の固体分率が増加する。この固体分率の増加は、reorientationあるいはrheopexyによるものと考えられ、この固体分率の増加が巻き上げ速度の低下を引き起こすと考えられる。

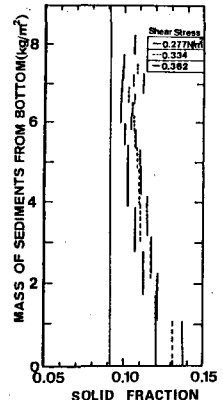


図-4 固体分率の鉛直分布

#### 4. 巻き上げ過程のシミュレーション

実験結果に基づき、以下の仮定を置く。①底泥はビンガム流体としての挙動を示す。②底泥の降伏値 $\tau_0$ は底泥の歪速度の時間積分値に比例して増加する(比例定数 $\beta$ )。③塑性粘土 $\mu$ は降伏値 $\tau_0$ に比例する(比例定数 $1/\beta$ )。④底泥には降伏値 $\tau_0$ の他に有効応力 $P_s$ に比例する(比例定数 $r$ )水平方向の力が剪断に抵抗する力として働く。⑤底泥の降伏値と巻き上げの限界剪断応力 $\tau_c$ は等しい。以上から $\mu$ を鉛直上向きを正として以下の式が得られる。

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\tau = -(\tau_y + rP_s) - \mu_P \frac{\partial u}{\partial x} \quad |\tau| \geq \tau_y + rP_s \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad |\tau| < \tau_y + rP_s \quad (4)$$

$$\tau_y = \alpha \int_0^t \frac{\partial u}{\partial x} dt + \tau_{y0} \quad (5)$$

$$\mu_P = \tau_y / \beta \quad (6)$$

ここで、 $\tau_{y0}$ は $t=0$ での降伏値である。

底泥に関して固相・液相の運動及び質量保存方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial P_s}{\partial x} - \frac{4}{k} (V_s - \frac{\epsilon}{1-\epsilon} V_s) + (1-\epsilon)(\rho_s - \rho_l)g = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial P_l}{\partial x} + \frac{4}{k} (V_s - \frac{\epsilon}{1-\epsilon} V_s) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial (1-\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial V_s}{\partial x} = 0 \quad (9) \quad \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial V_l}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

ここで、 $k$ : 粘性係数、 $\epsilon$ : 空隙率、 $P_s$ : 過剰間隙水圧、 $\epsilon$ : 透水係数、 $V$ : 空塔速度、 $\rho$ : 密度、 $g$ : 重力加速度、添字の $s, l$ は固相・液相を表す。

透水係数、有効応力を実験から求めると次のようになる。

$$\frac{P_s}{\rho_l g} = 0.0263 \times (1-\epsilon)^{1.17} \quad [m] \quad (11)$$

$$k = 2.02 \times 10^{-16} \left( \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \right)^{1.61} \quad [m^2] \quad (12)$$

固相分率と限界剪断応力の関係は、実験より

$$\tau_c = 2080 \times (1-\epsilon)^{3.9} \quad [N/m^2] \quad (13)$$

である。計算の簡素化のため、空間座標 $x$ を質量座標 $w (= \int_0^x (1-\epsilon) \rho_s dx)$ に変換し、計算は $\Delta t = 1 \text{ sec}$ 、 $\Delta w = 0.1 \text{ kg/m}^2$ とする差分法で行い、 $\beta = 0.1 \text{ sec}^{-1}$ 、初期空隙率は $0.906$ とし、 $V_s = 0$ とした。

$r = 0.01$ とした種々の $\alpha$ に対する単位面積当たりの底泥の巻き上げ量の計算例を図-5に示す。図中のプロットは実験値を示し、 $\alpha = 0.003 \text{ N/m}^2$ とした場合に計算値は実験値を概ね良く表わしている。

図-6は底泥の鉛直分布の水平方向移動量の計算結果であり、時間の増加につれて移動速度は徐々に小さくなる。また、剪断応力が大きくなった場合、水平移動の厚みはより深くなり、移動量も大きくなる。しかし、通水開始直後における計算値は実験値よりも移動量・減少速度共に小さくなった。図-7は通水1時間後の固相分率の鉛直分布の計算値を示しており、計算値は実験値よりも中間層において僅かに小さな値となった。

#### 5. おわりに

以上の計算結果は種々の剪断応力における柔い底泥の特性を良く示しており、概ね巻き上げ過程を表わし得た。今後、更に検討し、モデルを精緻なものとした。

参考文献 1) 楠田5, 汚泥の沈降凝集に関する研究, 土木学会論文集, 2948, pp59~71, 1980

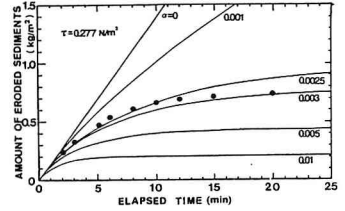


図-5 巻き上げ量の経時変化(計算値)

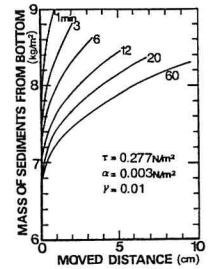


図-6 底泥の移動量(計算値)

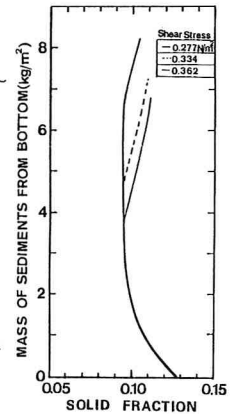


図-7 固相分率の鉛直分布(計算値)

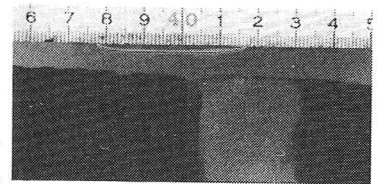


写真-1  $\tau = 0.277 \text{ N/m}^2$

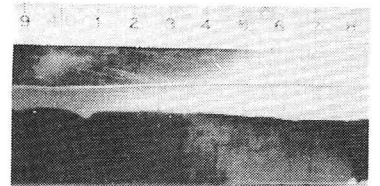


写真-2  $\tau = 0.344 \text{ N/m}^2$