

九州大学工学部 正 楠田 哲也 正 栗谷 陽一
 信州大学工学部 正 海田 輝之 正 大沼 正郁
 セントラルコンサルタント(株) 正 柳橋 巧

1. はじめに

底泥の巻き上げ量, 巻き上げ速度を精度よく求めることは, 港湾等の半閉鎖水域での水質汚濁現象を説明するうえで必要不可欠である。本研究では既に筆者らが示した巻き上げ速度の算定モデル¹⁾, 既ち, 底泥が剪断応力を受けることにより流動し, それに伴う変形により境界剪断力が増加するというモデルに, 有効応力に比例する力がさらに剪断に抵抗する力として加わるとしたモデルについて検討した。また, これらに圧密沈降を考慮した場合にはこの巻き上げ速度の算定方法を提示したものである。

2. 底泥の巻き上げ過程と巻き上げのモデル

比較的高含水比が高い底泥(通常300%以上)の一定剪断応力下での巻き上げ実験の結果より, ①底泥は実験開始後10~20分間急激に巻き上げられ(急速巻き上げ期), その後, 緩やかな巻き上げが続く(緩速巻き上げ期) ②巻き上げ速度の時間的な低下は, 底泥の流動に伴う底泥表層部の含水比の低下によって起こる, ③初期巻き上げ速度は $E = A(\frac{\gamma}{\gamma_c} - 1)^B$ であり, γ : 巻き上げの境界剪断力, A, B : 定数, γ_c : 表示し得る, 等が明らかになり, 下。さらに新たな実験として, 試料としてカオリン(平均粒径 $0.64 \mu m$)を用い, $\tau = 0.4 N/m^2$, $w = 465\%$ として初期の底泥の厚さ H_0 を変化させた場合のSSの経時変化を示したのが図-1である。この場合, H_0 が2cm以下になると巻き上げ速度, 巻き上げ量ともに急激に小さくなっていく。通水2時間後には巻き上げられずに残存した底泥の含水比の鉛直分布を示したのが図-2中の実線であり, 実験時に同一の水深にして2時間静置した場合の含水比の鉛直分布を示したのが図-2中の破線である。底泥は剪断応力が作用した場合に, 静置した場合に較べて含水比がかなり低下しており, 底泥の流動に伴う含水比の低下が顕著に認められている。また, H_0 が2cm以下の場合に巻き上げ量が低下することから, 圧密沈降による含水比の低下が巻き上げ速度の低下に影響していると考えられる。

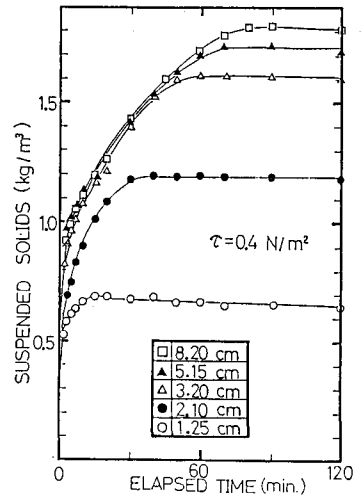


図-1 SSの経時変化

以上の実験結果にもとづき, 以下に示す仮定をおく。①底泥は連続体であり, ジンガム流体としての挙動を示す, ②底泥の降伏値 τ_y は底泥の垂直速度の絶対値の時間積分値に比例して増加する, ③塑性粘度 μ_p は降伏値 τ_y に比例する(比例定数 β), ④底泥には降伏値 τ_y の他に有効応力 P_v に比例する(比例定数 γ) 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境界剪断力 τ_c とは等しい。以上より, 底泥の運動方程式, 構成方程式はスエーデン上向を正として

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

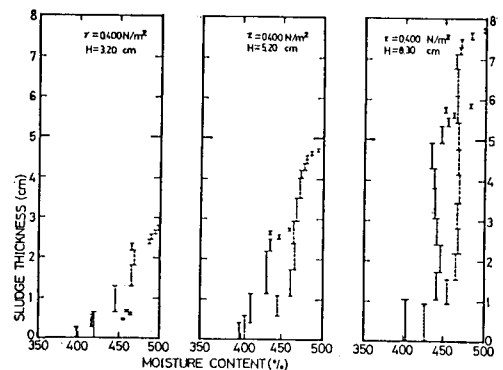


図-2 底泥の含水比分布

$$\tau = -(\tau_p + \gamma p_s) - \mu_p \frac{\partial u}{\partial x} \quad |\tau| \geq \tau_p + \gamma p_s$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad |\tau| < \tau_p + \gamma p_s \quad \left. \begin{array}{l} (2) \end{array} \right\}$$

$$\tau_p = \alpha \int_0^t \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right| dt + \tau_{p0} \quad (3)$$

$$\mu_p = \tau_p / \beta \quad (4) \quad \tau_c = \tau_p \quad (5)$$

$\tau = \tau_c$, τ_{p0} : $t=0$ の降伏値である。

本研究で用いた材料の場合、初期せんり上げ速度 E はでも変えた実験結果より

$$E \text{ (kg/cm}^2\text{sec)} = 0.0015 (\tau_c - 1)^{1.14} \quad (6)$$

が得られた。固相分率と τ_c の関係は $\tau_c \text{ (N/m}^2\text{)} = 3.39 (t-E)^{1.13} \quad (7)$

となった。また、圧密沈降による空隙率 ε の低下は

$$\dot{V}_s = -(t-E) \frac{K}{\mu} \left[(t-E)(p_s - p_e) \gamma + \frac{\partial p}{\partial x} \right] \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{E}{1-\varepsilon} \right) - p_s \frac{\partial}{\partial w} \left(\frac{V_s}{1-\varepsilon} \right) = 0 \quad (9)$$

$\varepsilon = \varepsilon$, V_s : 固相の空隙速度, K : 透水係数, μ : 粘性係数, p_s : 粒子密度, p_e : 液体の密度であり、(8), (9) 式を差分化すれば式 (8) の ε が求めらる。剪断歪と圧密沈降による ε の低下が加算できるとすれば、両者を考慮した場合のせんり上げ速度の算定が可能となる。

3. シミュレーションの結果

$\varepsilon = \varepsilon$ は圧密沈降の影響を考慮し、剪断歪のみを考慮して計算を行った。(4)~(5) 式を直接解くことは困難なため、差分化して数値計算を行った。計算は空間座標 x を質量座標 $w (= \int_0^x (1-\varepsilon) dx)$ に変換し、 $\Delta t = 1 \text{ sec}$, $\Delta w = 0.1 \text{ kg/cm}^2$, $p_s = 2.66 \text{ g/cm}^3$, $\beta = 0.1 \text{ sec}^{-1}$, $\gamma = 0.02$ とした。計算結果の一例として、 $w = 46.5\%$, $\tau_c = 0.4 \text{ N/m}^2$, $H_0 = 5 \text{ cm}$ の場合、 α の値に対する単位面積当りのせんり上げ量の経時変化を図-3 に示す。図中のプロットは同じ条件の下で行った実験結果を示している。計算値は α の値が大きくなるに従って剪断歪による表面の硬化の影響が大きくなるため、せんり上げ速度の時間的な低下が大きくなり、急速せんり上げ期の時間も短くなり、最大せんり上げ量も小さくなる。 $\gamma = 0.02$ とした場合の計算値は概ね実験値ともよく一致しているが、経過時間が50分程度になると計算値の方が実験値より大きくなる。次に、図-4 に表面における底泥の移動距離 S 及び境界剪断力 τ_c の計算結果を示す。本モデルでは τ_c の時間的な増加が底泥の移動距離に比例するため、 τ_c と S の変化はよく似た傾向を示しており、時間が経過するに従って両者ともその増加速度が徐々に低下し、2時間経過後は τ_c は作用している剪断力 0.4 N/m^2 にほぼ等しくなり、 S もほとんど変化しなくなっている。以上より、本モデルで仮定している程度まで、底泥の流動、流動に伴う底泥の硬化現象、せんり上げ速度の時間的な低下を説明できると考えらる。また、2で示した H_0 が小さい材料では最大せんり上げ量が小さくなるという実験結果は、図-3での α を大きくした場合と現象がよく一致し、圧密沈降も考慮すれば説明できると考えられ、今後この点について検討したい。

<参考文献>

- 1) Kusuda, T. et al: Erosional Process of Cohesive Sediments, Proc. 12th IAWQPR Conf. pp.291~293, 1989
- 2) 柳橋三: 底泥のせんり上げ特性に関する実験的研究, 昭和59年度東北支部, pp.160~161
- 3) 高橋三: 底泥のせんり上げに関する研究, 昭和59年度東北支部, pp.174~175
- 4) 楠田三: 汚泥の沈降沈降に関する研究, 土木学会論文報告集, 294, pp.57~71, 1980

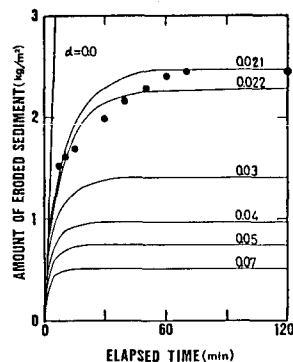


図-3 α の値によるせんり上げ量の経時変化

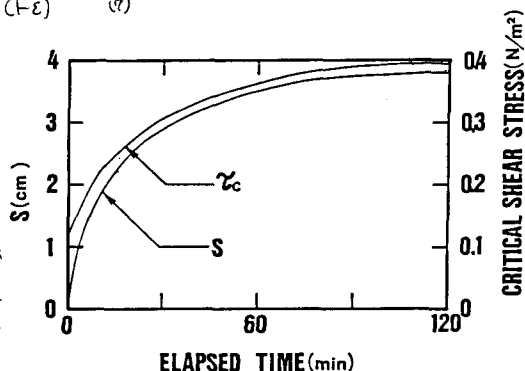


図-4 τ_c と S の経時変化