

底泥巻き上げ時の表層硬化現象の理論的考察

九州大学工学部 柳田 哲也 二彦 了

栗谷 陽一

岩手大学工学部 海田 輝之

1. まえがき

底泥の巻き上げ速度の決定機構の解明は、底泥の巻き上げ速度の算定式を求めるうえで欠かせないものである。底泥の巻き上げ速度は底泥が表層から順次巻き上げられていく場合、剪断応力と底泥粒のずれに抗する強度との関係によりほぼ定められる。既存の巻き上げ速度の算定式は底泥を連続体とし底泥の変形により限界剪断力が増加するとしたものである。本報告では、既存のモデルにおける降伏値に加えて有効応力に比例する力がさらに底泥の剪断流動に抗する力として存在するとしたモデルについて検討する。前報同様、本報告においても自重圧密による底泥の固相分率の増加は無視し得るとしている。

2. 底泥の巻き上げモデル

底泥を流水下で巻き上げると流れが与えられてから10~30分間の急速な巻き上げ(急速巻き上げ期)の後、巻き上げが1時間のスケールでは無視し得る緩やかな巻き上げ(緩速巻き上げ期)へと移行する。円形回転水路において粘土分30%、残りはシルト分の泥を用いた巻き上げ実験結果の例を図-1に示す。この図から急速巻き上げ

期の継続時間を T 、剪断応力を τ 、巻き上げ限界剪断応力を τ_c 、ビンガム流体としての塑性粘度を μ_p (後述の式(3)において $\beta=0.15$ としたもの)を用いた無次元化式がおおよそ、

$$(\tau - \tau_c) / \mu_p = 14000 \quad (1)$$

とすることから、急速巻き上げ期間長は底泥の流動特性に依存している

ことが解る。図-1の含水比400%の場合の巻き上げ2時間後の残存底泥の固相分率分布を図-2に示す。固相分率の増加状態が剪断応力が大きいほど大きくなっていることから急速巻き上げ期は底泥表層の固相分率の増加にともなう強度の増加により終了すると考えられる。このような実験事実に基づいて、想定される巻き上げ機構

のモデルは次の仮定に基づいて以下のように導かれる。仮定①底泥と上層水の界面における応力変動は平均剪断応力 τ に較べて無視できる、②底泥は連続体でありビンガム流体の性質を示す、③底泥の圧密沈降は無視しえる、④底泥の巻き上げ過程は水平方向に一樣である、⑤底泥の降伏値 τ_y は底泥の歪速度の絶対値の時間積分値に比例して増加する、⑥塑性粘度 μ_p は降伏値に比例する、⑦底泥には降伏値の他に有効応力 P に比例する(比例定数 β)水平方向の力が剪断に抗する力として剪断に際して現れる、⑧底泥の降伏値と巻き上げ限界剪断力 τ_c とは相等しい。以上の仮定に基づく底泥の運動方程式、構成方程式は x を鉛直上向きと正として

$$\partial \tau / \partial x = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tau &= -(\tau_y + \beta P_s) - \mu_p \frac{\partial u}{\partial x} & |\tau| \geq \tau_y + \beta P_s \\ \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 & |\tau| < \tau_y + \beta P_s \end{aligned} \quad (3)$$

	SHEAR STRESS %	WATER CONTENT %
□	0.30	300
□	0.40	300
□	0.50	300
△	0.25	365
△	0.30	365
△	0.40	365
○	0.20	400
○	0.25	400
○	0.30	400
○	0.40	400

図-1 円形回転水路における底泥の巻き上げ実験結果

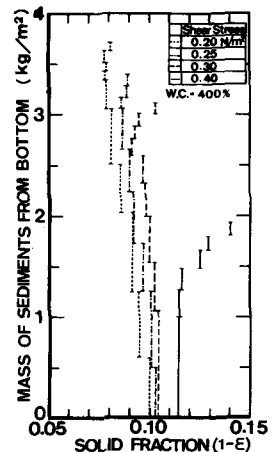
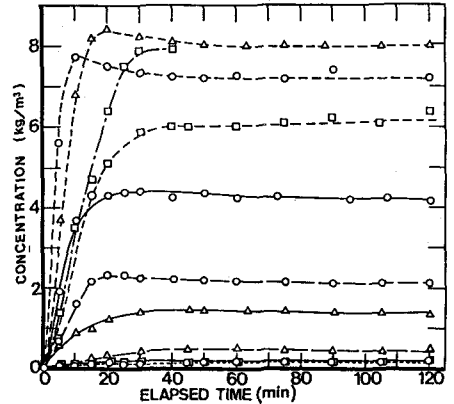


図-2 残存底泥の固相分率分布

$$\mu_p = \tau_y / \beta \quad (4)$$

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

$$\tau_c = \tau_y \quad (6)$$

ここに、 τ_{y0} :初期の降伏値、 β :定数($=0.1 \text{ sec}^{-1}$)³、 α :定数である。 γ として図-2に与えられている残存底泥の表層部の固体分率分布が定常状態に達しているものとして、 $\tau + \tau_y + \gamma \beta = 0$ を解くと $\gamma = 0.02$ とする。固体分率 $1-\varepsilon$ と τ_c との関係は、図-2における底泥表層部の固体分率と剪断応力の関係から

$$\tau_c = 4.14 (1-\varepsilon)^{1.2} \text{ N/m}^2 \quad (7)$$

が得られる。底泥の初期巻き上げ速度 $E_{t=0}$ は、

$$E_{t=0} = \lambda (\tau_c - 1)^n \quad (8)$$

で与えられるとし、係数入、 n は図-1の結果から $\lambda = 0.0006 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 、 $n = 2.2$ とする。

3. シミュレーション結果

式(2)~(6)を直接解くことは困難なので差分化し、時間に関して Crank-Nicholson 法に基づいて数値計算を行なった。計算に際しては空間座標 z を質量座標 $w (= \int_0^z (1-\varepsilon) dz)$ に変換した。計算条件は、 $\Delta t = 1 \text{ sec}$ 、 $\Delta w = 0.1 \text{ kg/m}^2$ 、 $\gamma = 0.02$ 、 $\beta_s = 2.6 \text{ kg/m}^2$ とした。式(7)の変換式は、巻き上げ限界剪断力を τ_c とすれば一致しないため、式(6)を含めて実験による決定を必要とする。シミュレーション結果の一例として剪断応力 0.3 N/m^2 、含水比 400% の実験に相当するものを図-3に示す。初期固体分率は巻き上げ速度を合わせるため含水比 400% から求められるものでなく式(7,8)から逆算される値を使用した。その値は $1-\varepsilon = 0.05$ であった。いずれの場合も α が大きいほど時間的に早く緩速巻き上げ期に入る。この例の場合、 $\alpha = 0.0011 \text{ N/m}^2$ のとき巻き上げ開始後 10 分前後のところで巻き上げ量が小さ目になっているが、緩速巻き上げ期に入ったときの巻き上げ量はほぼ一致している。このときの固体分率の変化と巻き上げ量の変化を図-4に示す。固体分率が変化する泥厚は α により規定され本例では表面から 0.89 kg/m^2 の深さまで及ぶ。

固体分率の変化は直線的になっているが、図-2の実験結果によれば表面に近しいところの方が固体分率の増加割合が大きくなっている。この点に関してはモデルの考え方を改める必要がある。図-5に表層におけるすり量と降伏値の変化を示す。すり量は 1 時間で 13 cm 程度となるが、この値は実験にて得られたものより 2 倍近く大きいと推定される。降伏値の増加率は時間とともに減少するが、その値が剪断応力に近づくにつれて、巻き上げ速度の減少の方が速く、表層の固体分率の増加のみが進行する結果となる。今後、粒状体物質の流動過程、自重圧密の影響等検討を重ねていく予定である。本研究は文部省科学研究費一般(C)の補助を受けたものである。

参考文献

- 1) Kusuda, T. et al: Erosional Process of Cohesive Sediments, Proc. 12th IAWPRC Conference, pp891-903, 1984
- 2) 二渡了也: 円形回転水路とその流況特性, 立教大学工学集報, Vol. 57, No. 4, pp 431-435, 1984.
- 3) 山下三平他: 高濃度凝集性懸濁液のレオロジー特性, 昭和 57 年度工本学会西部支部研究発表会講演概要集, 1985.

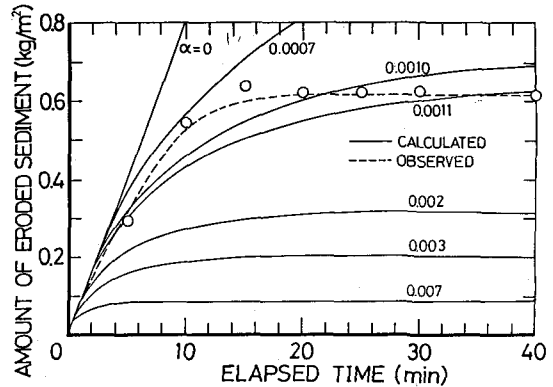


図-3 シミュレーション結果 ($\tau = 0.3 \text{ N/m}^2$)

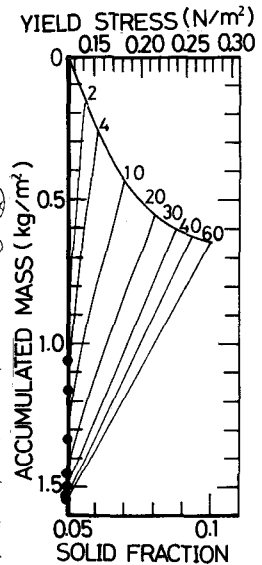


図-4 計算による固体分率の変化

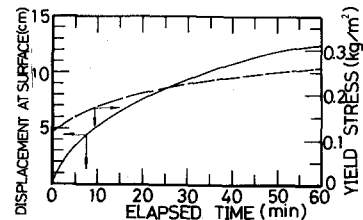


図-5 計算によるすり量と降伏値