

II-579

底泥の力学的特性に関する実験的研究

東京大学大学院 学生員 沈 道顕
 東京大学工学部 正会員 磯部 雅彦
 東京大学工学部 正会員 渡辺 晃

1 はじめに

海岸や河口域に存在する粘土-シルト系粒子からなる軟弱底泥は、波や流れの影響を受けて、巻き上げ、沈降、輸送、堆積といった現象を繰り返し、水質汚濁や航路および泊地の埋没等の諸問題を引き起こしている。波による底泥移動量を算定するためのモデルとして現在までに、粘性流体多層モデル(中野ら, 1987)、粘弾性体多層モデル(柴山ら, 1989、Ngugen, 1991)などが提案されている。しかし底泥の力学的性質については単純化されたモデルが用いられている。本研究では広範な条件のもとで、底泥の歪・速度とせん断応力との関係について、カオリナイトおよび現地泥を用いた実験を行った。計測結果に基づいて底泥のレオロジーモデルを新たに提案するとともに、それに含まれるパラメータの値を評価するための方法を示した。さらにこのモデルを用いて、底泥運動を数値シミュレーションし、移動量の算定を行った。

2 実験方法

本研究に使用した試験装置は、Huynh(1990)によるものを若干改良した底泥用動的回転せん断試験機である。試料には、市販のカオリナイトと東京湾で採取した現地底泥(粘土83%、シルト13%)を用いた。実験条件の範囲は、含水比120%~350%、周期0.5~30(s)、速度0.5~7(s⁻¹)であり、総ケース数約150となった。同一の含水比での実験条件では、以下の3つを考慮した。

1. 周期を一定とし、振幅を変化させる。
2. 振幅を一定とし、周期を変化させる。
3. 振幅と周期の比率を一定とし、周期、振幅ともに変化させる。

また、塩分の影響を調べるため、塩分濃度約3.40%で、密度1.024の海水も用いてカオリナイトの実験を行った。

3 実験結果および考察

実験によって得られた主な知見は以下の通りである。

- (1) せん断応力が小さい場合には底泥は粘弾性体に近い。せん断応力が増加すると塑性体に近づく。せん断応力と歪速度との関係($\tau \sim \dot{\gamma}$)において、振幅が限界値 τ_0 を越えると歪速度 $\dot{\gamma} = 0$ のときには一定の限界せん断応力値をとる。(図-1, 2)
- (2) せん断応力と歪速度との関係曲線で、ある歪速度臨界値 $\dot{\gamma}_c$ を越えると、歪速度の増加時と減少時のせん断応力が等しくなり、また歪速度の変化に伴うせん断応力の変化が緩慢になる。
- (3) カオリナイトに対して海水を用いた実験を、水道水を用いた実験と比較すると、せん断応力は10%~15%大きくなる。その原因は海水中塩分の存在により、粒子間の摩擦力が増加するためであると思われる。
- (4) 現地泥を用いた実験結果(図-3)において、せん断応力と歪 $\tau \sim \varepsilon$ せん断応力と歪速度 $\tau \sim \dot{\gamma}$ の関係の傾向はカオリナイトの場合とほとんど同じであるが、せん断応力の絶対値はカオリナイトの場合の1.0~2.7倍ぐらいである。これは現地泥の場合、粒子間の粘着力は小さいものの、摩擦力が大きいためであると思われる。

4 底泥のレオロジーモデル

本研究での実験結果と前実験結果(Huynh, 1990)に基づいてレオロジーモデルを修正した結果を以下に示す。

$$\tau_{xy1} = \text{sign}(\dot{\gamma})(\tau_0 + \mu'(|\dot{\gamma}|)^{n_1}) \quad (1)$$

$$\tau_{xy2} = \tau_{\text{turn}} + k \times \text{sign}(\dot{\gamma})(G'(|\varepsilon_{\text{turn}} - \varepsilon|)^{n_2}) \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \begin{cases} \tau_{xy1} & \text{if } |\tau_{xy1}| \leq |\tau_{xy2}| \\ \tau_{xy2} & \text{if } |\tau_{xy1}| > |\tau_{xy2}| \end{cases} \quad (3)$$

ここに k は対称運動時の平均せん断応力を0にするための応力調整係数であり、

$$k = 1.0 + \alpha_0 \frac{\tau_{\text{turn}}^i + \tau_{\text{turn}}^{i-1}}{\tau_{\text{turn}}^i - \tau_{\text{turn}}^{i-1}} \quad (4)$$

とおく。これにより、波と流れ共存場に、このモデルを適用することができる。

添字 $i, i-1$ は半周期ごとに付した番号であり、 α_0 は小さい定数（ ~ 0.05 ）である。式中の係数 G' および μ' は弾性および粘性の性質を表す係数であり、 $\tau_{turn}, \varepsilon_{turn}$ は歪速度が0となるときのせん断応力と歪である。

実験結果によると、 G' は周期にあまり影響されず、次式のような含水比の関数となる。

$$G'(w) = 1.82215 \times 10^7 w^{-2.3147} \quad (5)$$

係数 n_2 は $0.31 \sim 0.36$ の間であるので、 $n_2 = 1/3$ とした。

μ' は非常に複雑な関数で、含水比や周期に影響されることがわかった。しかし、含水比 w の影響が大きいので、周期に関する平均値として次式を得た。

$$\mu'(w) = 8.816 \times 10^3 w^{-1.256} \quad (6)$$

さらに n_1 の値は $1/3$ 程度となった。

限界せん断応力 τ_0 は、底泥の粘弾性特性に関する、重要なパラメータであり、周期と振幅は τ_0 に与える影響が小さいので、次式で表される。

$$\tau_0(w) = 1.959 \times 10^7 w^{-2.452} \quad (7)$$

このモデルではせん断応力の変化率が不連続であるため、底泥運動の数値シミュレーションにおいて、計算を収束させるためには、底泥輸送量算定の数値計算アルゴリズムに工夫が必要である。図-4 にストークスドリフトの計算例を示す。参考のためには Sakakiyama and Bijker (1989) の実験値を示す。計算値はオイラー流速を含んでいないため、直接比較はできないものの、分布形状は似たものとなっている。

5 おわりに

本研究では底泥の力学的特性に関する実験結果と分析し、それに基づく数値シミュレーションモデルを提案し、数値計算を行った。今後は、本モデルを用いて、種々の条件のもとで計算を進めて行く予定であるが、底泥移動量の予測をより正確にするために実験装置の改良、また新たな実験装置の設計が必要だと考えられる。

6 参考文献

- (1) Sakakiyama, T. and Bijker, E. W. (1989): Mass Transport Velocity in Mud Layer due to Progressive Waves, J. of WW, ASCE, vol.115, No 5, pp.614-633.
- (2) 柴山ら (1989): 粘弾性体モデルによる底泥移動量の評価法、海岸工学論文集, 第36巻, pp.334-338.

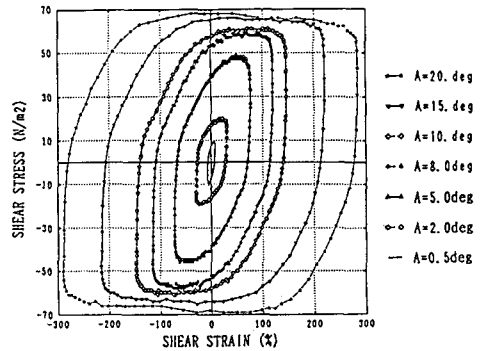


Fig. 1 Shear Stress & Shear Strain ($w=197.3\%$)

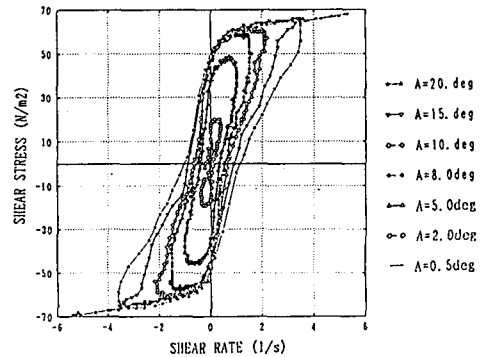


Fig. 2 Shear Stress & Shear Rate ($w=197.3\%$)

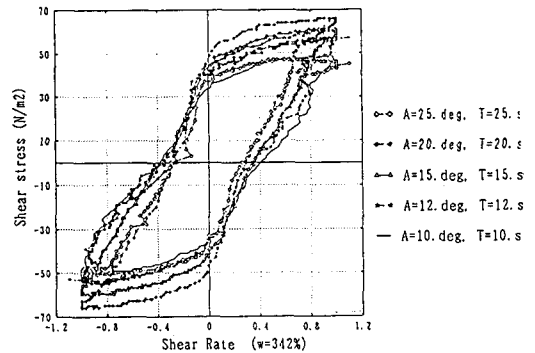


Fig. 3 Shear Stress & Rate of Mud from Tokyo Bay

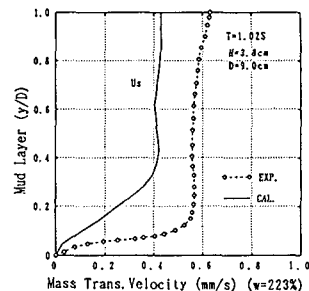


Fig. 4 Measured and Computed Velocity Profile (Case 3)