

II-229

静止領域を考慮した底泥の流動モデル

西日本旅客鉄道 正員 宮本 正文
 神戸大学工学部 正員 神田 徹
 神戸大学大学院 学生員 渡邊 武志

1. まえがき

河川感潮部, 浅い湾や湖沼等の底に堆積している底泥, いわゆるヘドロは, 水域に様々な悪影響を及ぼしており, 近年, 環境問題の一環としてその対策が検討されている. 本研究では, 水の流れによってどの深さまでの底泥がどのように運動するかを調べるために, 泥表面に水流によるせん断力を与え, それによって泥が流動する現象のモデルを作成する. このモデルを用いて底泥の流動化層厚, 底泥流速を計算し, 泥表面せん断応力や底泥の含水比がそれらに及ぼす影響を基礎的に考察する.

2. 底泥上の水の流速分布

底泥上の水の流速分布が粘性底層外, 粘性底層内に分けて, それぞれ式(1), (2)で表されると仮定する.

$$\frac{U}{u_x} = \frac{u_{1u}}{u_x} + 5.5 + 5.75 \log_{10} \left(\frac{u_x y}{\nu_0} \right) \quad \dots (1) \quad \frac{u_0}{u_x} = \frac{u_{1u}}{u_x} + \frac{u_x y}{\nu_0} \quad \dots (2)$$

ここに, U : 水泥界面から $y (\geq \delta_L)$ だけ離れた点の流速 (粘性底層外の流速), u_0 : 水泥界面から $y (\leq \delta_L)$ だけ離れた点の流速 (粘性底層内の流速), δ_L : 粘性底層厚, u_{1u} : 底泥表面 ($y=0$) の流速, u_x : 摩擦速度, ν_0 : 水の動粘性係数. 水泥界面付近の流速分布の模式図を図-1に示す.

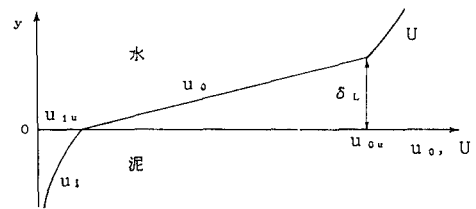


図-1 水泥界面付近の流速分布

3. 底泥の流動モデル

本研究では, ある深さまで泥は流動し, それより下では静止している状態を対象として流動解析を行う.

図-2に示すように, 泥表面より下を各層の厚さが ΔH の泥層に分割する. ここに, μ_0 は水の粘性係数, τ_0 は泥表面せん断応力, W_i は底泥の含水比, τ_{yi} は底泥の降伏せん断応力, μ_{bi} は底泥の塑性粘度, 添字 i は第 i 層 ($i=1, 2, \dots$) を示す. 含水比の鉛直分布は図-2右図に示すようであり, W_s, W_x はそれぞれ $y=0, y=-\infty$ での含水比である. また以下の流動解析では, 流動によって底泥内に生じるせん断応力 τ はずり速度 D と含水比 W の関数, 底泥の降伏せん断応力 τ_y は含水比 W の関数であることを考え, これらの関係はカオリナイト粘土の実験から得られた関係式を用いた.

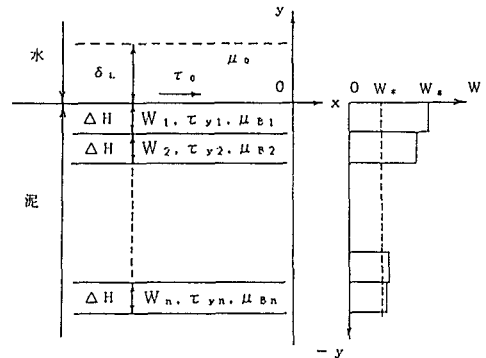


図-2 モデルの説明図

3.1 モデルの仮定

本流動モデルの仮定は, ①流れは定常で, $x-y$ 平面内の二次元流れであり, $v=0, \partial/\partial x=0$, ②底泥はビンガム流体, ③各泥層内では物性値は一定, ④泥第 i 層の含水比は式(3)で与える.

$$W_i = W_x + W_s \cdot 10^{-(i-1)/M} \quad \dots (3)$$

ここに, $W_x = W_s - W_s$, M : 単位深さあたりの泥層数.

3.2 基礎式および境界条件

上記の仮定より, 泥第 i 層, 粘性底層内の x 軸方向の運動方程式はそれぞれ式(4), (5)となる.

$$\frac{d^2 u_1}{dy^2} = 0 \quad \dots (4)$$

$$\frac{d^2 u_0}{dy^2} = 0 \quad \dots (5)$$

境界条件は、① $y = \delta_L$ で $u_{0L} = \tau_0 \delta_L / \mu_0$ 、② $y = -\delta_m = -n \Delta H$ で $u_{n1} = 0$ 、③ 水-泥界面で $u_{01} = u_{1u}$ 、 $\tau_0 = \tau_1$ 、④ 泥第 i 層-第 $(i+1)$ 層界面で $u_{i1} = u_{i+1u}$ 、 $\tau_i = \tau_{i+1}$ ($i=1, 2, \dots, n$)。ここに、 u_i は泥第 i 層流速、添字 u 、 l はそれぞれ各層の上端、下端を示す。 δ_m は流動化層厚で、これより深い部分 ($y < -\delta_m$) では泥は静止している。

4. 計算手順

計算手順のフローチャートを図-3に示す。各層のずり速度 D_0 、 D_1 が与えられると、対応するせん断応力 τ が定まり、基礎式 (4)、(5) は上記の境界条件のもとで解け、 u_0 と u_1 が求められる。また本流動モデルの場合、各層のずり速度は du_0/dy 、 du_1/dy から求められる。このずり速度が先に与えたずり速度 D_0 、 D_1 と異なる場合、 $D_0 \leftarrow du_0/dy$ 、 $D_1 \leftarrow du_1/dy$ として再び計算を行い、ずり速度が収束するまで計算を繰り返す。以上の計算を泥第1層： $n=1$ から始め、 $\tau_n < \tau_{yn+1}$ (τ_{yn+1} : 第 $n+1$ 層の降伏せん断応力) とするまで繰り返す。その結果、 u_0 、 u_1 ($i=1, 2, \dots, n$) および流動化層厚 δ_m が求められる。

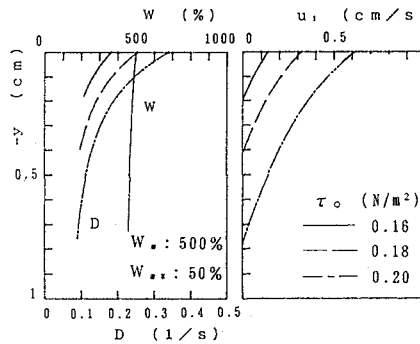
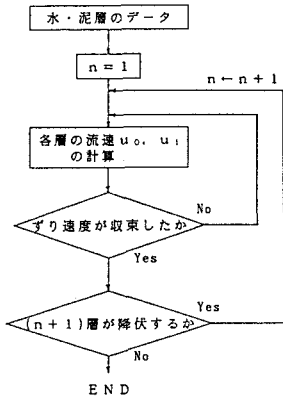


図-4 D, u_1 の分布

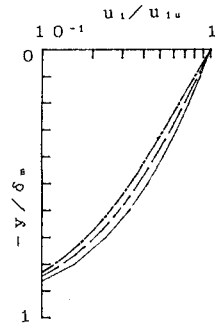


図-5 底泥流速分布

図-3 計算手順のフローチャート

5. 計算結果

流動化層厚、底泥流速に及ぼす泥表面せん断応力の影響について調べる。ずり速度 D および底泥流速 u_1 の分布を図-4に示す。 τ_0 が大きいほどずり速度 D 、流動化層厚 δ_m 、底泥流速 u_1 は大きい。この u_1 を片対数紙上に図示したものが図-5であり、 τ_0 が大きいほど指数分布に近い。

W_{**} を一定 (50%) とし、 W_* を変化した場合の τ_0 と δ_m の関係を図-6 に、 τ_0 と平均底泥流速 u_{av} の関係を図-7に示す。ただし、 $\delta_m \leq 5$ cm での計算結果である。各曲線の下端では流動化層数は1 ($\Delta H = 0.02$ cm) であり、

計算上はこの点より大きな τ_0 によって泥の流動が始まる。 W_* が大きいほど τ_0 の小さい値で底泥は流動を始め、同一の τ_0 に対する δ_m あるいは u_{av} の値は大きくなる。

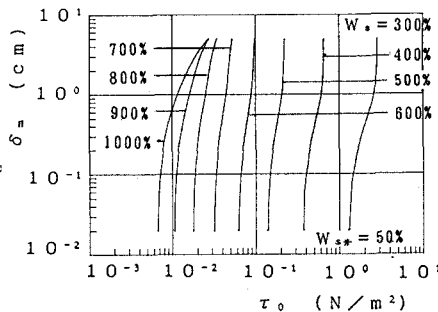


図-6 $\tau_0 - \delta_m$ 関係

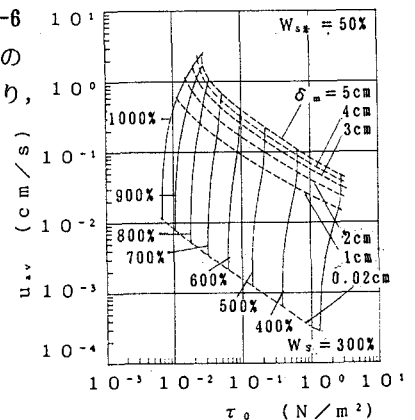


図-7 $\tau_0 - u_{av}$ 関係