

シルテーション対策用潜堤の効率評価に関する研究

九州大学 学生会員 ○井上 直哉 青木 聡
九州大学 正会員 入江 功 小野 信幸

1. はじめに

シルテーションとは、粘土やシルトなどの微細な底質が波や流れの作用により運ばれ、航路や泊地に堆積することで、船舶の航行や漁業などにしばしば支障をもたらしてきた。この対策として熊本港では、図1のように、航路や泊地周囲への逆T字型潜堤設置による埋没対策が実施され、その有効性が確認されている。昨年までの研究では、シルテーション対策における潜堤の役割や、効果の高まる形状について、図2に示す種々の断面形状の潜堤を用いて、実験的に検討してきた。しかし、シルテーション対策の効果を適切に評価するには、波や流れ、潜堤の高さや形状、Fluid mud 厚など、様々な要因の変化に対する影響を考慮する必要がある。本研究では、密度流モデルによる数値シミュレーションにより模型実験での流動を再現し、これまで提案された潜堤形状や組み合わせによる埋没防止効果を相対的に評価した。

2. 計算モデルの概要

密度流モデルの基礎式は、以下のような連続の式(式①、①)、運動方程式(式②)、濃度の移流拡散式(式③)、状態方程式(式④)である。

$$\frac{\partial B\eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} uBdz = 0 \dots \text{①} \quad Bw|_{z=z_k} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{z_k} uBdz = 0 \dots \text{①}$$

$$\frac{\partial (uB)}{\partial t} + \frac{\partial (uuB)}{\partial x} + \frac{\partial (uwB)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(BN_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(BN_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{gn^2}{R^{1/3}} |u| \frac{\partial S}{\partial z} - Bg \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{Bg}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \rho dz \dots \text{②}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (cB) + \frac{\partial}{\partial x} (cuB) + \frac{\partial}{\partial z} (cwB) = \frac{\partial}{\partial x} \left(BK_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(BK_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (cw_f B) \dots \text{③}$$

$$\rho = \rho_w + (\rho_s - \rho_w)c \dots \text{④}$$

ここで、tは時間、x、zは水平・鉛直方向の座標、Bは水槽幅、Rは径深、Sは潤辺、ηは水面変位、u、wは水平・鉛直流速、cは浮泥濃度、w_fは底質沈降速度、nはマニングの粗度係数、ρは密度、ρ_sは土粒子密度、ρ_wは水の密度、N_x・N_zは水平・鉛直方向の渦動粘性係数、K_x・K_zは水平・鉛直方向の渦動拡散係数である。

これらの式を鉛直2次元の多層モデルとして差分化し、時間発展的に流速と濃度を求めた。

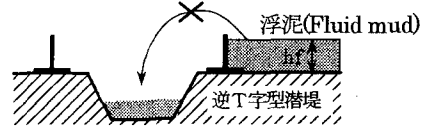


図1 潜堤によるシルテーション対策

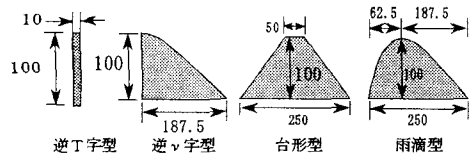


図2 実験に用いた潜堤の形状(単位:mm)

計算の結果は、式②の渦動粘性係数(N_x,N_z)や、式③の渦動拡散係数(K_x,K_z)に大きく影響を受ける。シミュレーションによって模型実験の流れを再現するには、これらの係数を適切に算定する必要がある。

まず、鉛直方向の渦動粘性係数は、均一流体の場合 $v_{mz0} = \kappa u_* z (1 - z/h)$ で評価される。ここで、κはカルマン係数(=0.4)、hは水深、u_{*}は摩擦速度である。Fluid mudのような濃度成層が形成される流体中では、密度差によって生ずる浮力の効果により、その運動量の交換が均一流体に比べ小さくなる。Bowdenは、密度差の影響の大きさを規定するリチャードソン数 $Ri = -\frac{g(d\bar{\rho}/dz)}{\bar{\rho}(du/dz)^2}$ を導入し、渦動粘性係数を $N_z = v_{mz0} (1 + aRi)^b \dots \text{⑤}$ で

評価している。ここで、a=3.33、b=-1.5の定数である。(水理公式集) 渦動拡散係数K_zについては、渦動粘性係数に比例すると仮定して $K_z = \alpha N_z$ として評価されることが多く、本計算ではα=1、つまり、 $K_z = N_z$ とした。

水平方向の渦動拡散係数はFischerが与えた広幅開水路の拡散係数の式より $K_x = Ahu_* \dots \text{⑥}$ で評価される。定数Aは多層モデルの場合0.5~0.7の値がとられ、ここではA=0.6を与えた。水平方向の渦動粘性係数は、鉛直方向の場合と同様に、 $N_x = K_x$ として与えた。

3. 結果と考察

図3は計算結果の一例であり、計算領域に設けた落ち込みに浮泥が流入する状況を表している。(a)の潜堤がない場合では、落ち込みに大量の浮泥が流入し、(b)の潜堤がある場合では浮泥の流入が阻止されている様子が再現されている。このような流動の計算精度を検証するた

めに、図3の航路中央部の測定点で計測された浮泥濃度を実験値と比較した。実験データは水底から高さ20cmまで5cm間隔で測定されたものである。

まず、鉛直方向の粘性・拡散係数(式⑤)について検討した。図4は潜堤を設置しない場合で、浮泥流動開始5分後の底面付近での浮泥濃度の平均値を実験と計算で比較したものである。初期浮泥厚が5cmと10cmの場合について、 K_z にリチャードソン数による減衰効果を考慮した場合としない場合の計算結果を示した。これより、 K_z については密度差の影響を考慮した方が実験との一致度が高いことがわかる。

次に、水平方向の粘性・拡散係数(式⑥)について検討した。図5は、図2の潜堤を設置し、初期浮泥厚が7cmのもとで、断面平均流速8.5cm/sの流れを起こし、90秒後の濃度分布の計算結果である。図5は、式⑥をそのまま用いて評価したものであるが、潜堤の形状による違いが見られない。これは、潜堤の下流側に発生する渦による拡散の効果が含まれていないためと考えられる。そこで、潜堤の下流側における水平拡散係数を $K_x = \beta K_{x0}$ (K_{x0} は式⑥で評価されるもの)として、拡散を促す渦の効果を評価した。ここで、 β は潜堤の設置位置で最大値 β_{max} をとり、潜堤高 hs の7倍の距離の間で潜堤からの距離に比例して線形的に1へと減少すると仮定した。

図6は、断面平均流速を4.9cm/s、7.0cm/s、8.5cm/sと変えた場合の底面濃度の平均値を、 β を変化させて求めたものである。これより、潜堤形状が逆T字型と逆V字型では $\beta_{max}=20$ 、台形型では $\beta_{max}=10$ 、雨滴型では $\beta_{max}=6$ 程度のときに実験値とほぼ一致する。この様に、潜堤の形状により最適な β の値が異なるのは、逆T字型と逆V字型のような直立部を持つ形状であれば発生する渦の規模が大きく、台形型と雨滴型では渦の規模が小さいという模型実験で確認されていることと一致している。

図7は、各形状における最適な β を用いて、流速8.5cm/sの時の濃度分布を示したものである。図より、台形型と雨滴型の場合に濃度分布の傾きがうまく再現されていないものの、計算結果はほぼ航路に流入する浮泥量を正しく評価していると考えられる。

4. まとめ

埋没防止潜堤の形状の効果を、水平拡散係数の増加率 β で評価することで、航路への浮泥流入量を精度良く再現することが可能となった。今後、波が生じる場合を検討し、各種潜堤の埋没防止効果を評価する予定である。

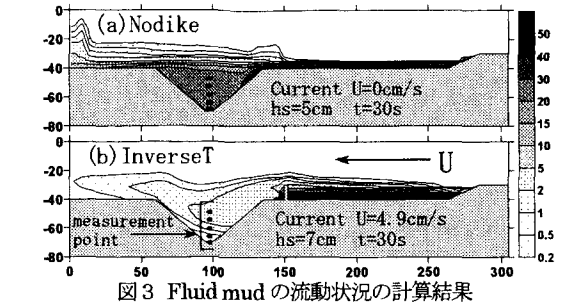


図3 Fluid mudの流動状況の計算結果

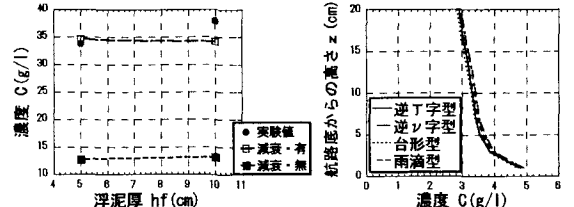


図4 潜堤なしの平均濃度

図5 条件①の濃度分布

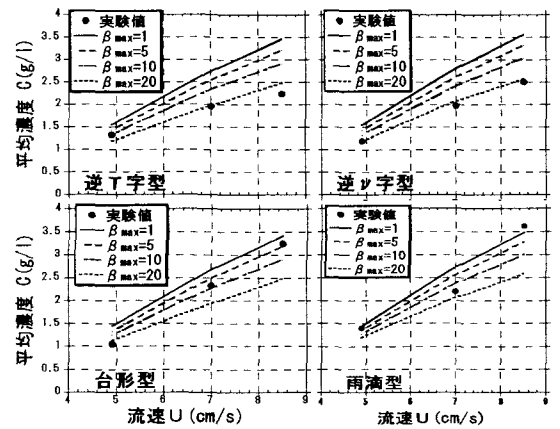


図6 β を変えた場合の平均濃度

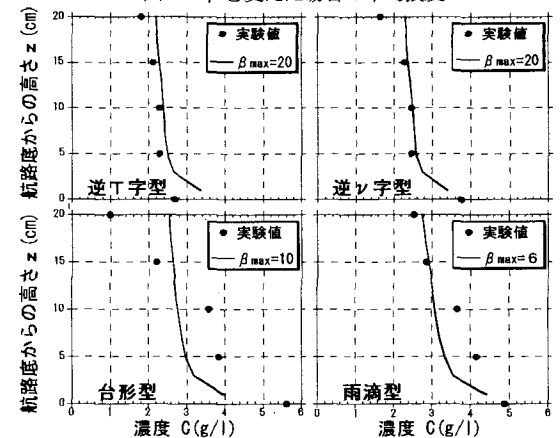


図7 最適な β での濃度分布

参考文献

- 埋没防止潜堤の最適断面形状に関する研究調査報告書
九州大学・国土交通省地方整備局, 2002年
- 水理公式集, 土木学会, 1999年