

汚濁拡散防止膜の効果に関する研究

小田一紀*・重松孝昌**・濱崎佳尚***・山瀬晴義****

1. ま え が き

近年、ウォーターフロント開発に伴う沿岸工事の数は非常に多く、また積極的に海洋空間を利用すべく人工島や海上空港等の建設が進められている。これらの工事では土砂などによる汚濁の発生は避けられないものである。したがって、発生した汚濁の拡散を防止する対策を施すことが不可欠となっている。

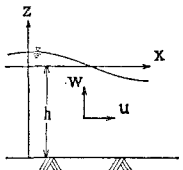
現在、これらの海洋工事の際には工事による濁りの拡散を防止するために工事区域周辺に汚濁拡散防止膜を敷設することが通例となっている。しかし、汚濁防止膜の形状や張力などの力学的な研究は多少見られるものの(例えば、榎木ら, 1987)、膜の汚濁拡散防止効果についてはその研究例は少なく(例えば、加納ら, 1987, 1989)、実験的にも理論的にもまだ十分に検討されているとはいえない。特に、膜の高さや汚濁発生源からの距離などの設置諸元が汚濁の拡散防止効果に及ぼす影響についてはほとんど明かにされていないのが実状である。

本研究はこのような観点から、数値シミュレーションを用いて汚濁拡散防止膜の設置効果について検討するものである。実海域における膜の効果について検討するときには本来、3次元的な取り扱いが必要であるが、ここでは研究の基礎段階として現象を鉛直2次元問題として取り扱い、自立式防止膜と垂下式防止膜の効果の違いを明かにするとともにそれぞれの膜高さの相違が効果に及ぼす影響について検討する。さらに、これらの防止膜を併用したときの防止効果について検討する。

2. 基本方程式と計算手法

図一1に示すような2次元座標系を設定する。

流れの基本式は、非圧縮粘性流体の連続の式



図一1 座標系

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

を用い、水平方向および鉛直方向の運動方程式は以下の式を用いる。

水平方向の運動方程式:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \varepsilon_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \varepsilon_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

鉛直方向の運動方程式:

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 u, w はそれぞれ x, z 方向の流速、 g は重力加速度、 p は圧力、 ρ は流体の密度、 $\varepsilon_x, \varepsilon_z$ は、 x, z 方向の渦動粘性係数である。

さらに汚濁の拡散に対しては、次式で表される拡散方程式を用いる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + w \frac{\partial c}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) - w_0 \frac{\partial c}{\partial z} + q \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 c は濃度、 D_x, D_z は x, z 方向の拡散係数、 w_0 は土砂の沈降速度、 q は単位時間当たりの汚濁負荷量である。

計算手法は、堀江(1980)によって開発された陰解法モデルを用いた。このモデルは、運動方程式の圧力項を連続の式を用いて消去し、それを z 方向に積分して得られる式より線流量を求め、これより水位変動量を得、さらに求めた線流量を各層の流速に配分するものである。詳細は堀江(1980)を参照されたい。

3. 計算条件

計算の対象とした鉛直断面領域を図一2に、また計算条件を表一1に示す。

膜の設置効果に影響を及ぼす因子としては、汚濁の発生形態や汚濁発生源からの距離、膜の高さや配置等が挙げられ、また複数の防止膜を使用する時には膜間の距離等も影響することが考えられる。このうち、土砂の投入

* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 工修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科
*** 学生員 大阪市立大学大学院 工学研究科
**** (株)ブリヂストン

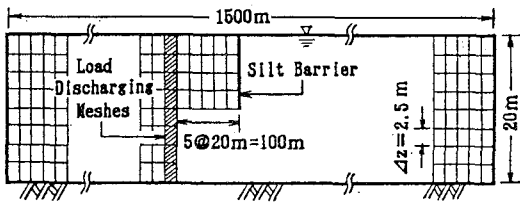


図-2 計算対象領域

表-1

計算対象領域	1500m (水平)×20m (鉛直)
格子間隔	$\Delta x=20\text{m}$, $\Delta z=2.5\text{m}$
土砂沈降速度	0.009cm/sec (粒径 10^{-2}cm に相当)
汚濁負荷量	1000kg/hr を与え続ける
拡散係数	$D_x=10^4\text{cm}^2/\text{sec}$, $D_z=10^2\text{cm}^2/\text{sec}$
渦動粘性係数	$\varepsilon_x=\varepsilon_z=10^6\text{cm}^2/\text{sec}$
タイムステップ	$\Delta t=60\text{sec}$
境界条件	両端で対数分布を持つ平均流速 10cm/sec の定常流を与える

や浚渫による汚濁の発生形態については未解明な点が多く、現段階ではこの影響を考慮した膜の設置効果の検討は困難であると思われる。したがって、ここでは現象を単純化し、汚濁源は全水深にわたって一様な濃度を与え続ける面源とする。

まず、自立式あるいは垂下式防止膜単独設置のときのそれぞれの設置効果に及ぼす膜高さの影響を検討するために、自立式の場合は水深 h に対する膜高さ H_a の比を $H_a/h=1/4, 2/4, 3/4$ に変えて、また垂下式の場合は水深 h に対する膜高さ H_u の比を $H_u/h=1/4, 2/4, 3/4$ に変えて流況と拡散の計算を行う。この時、汚濁負荷地点と防止膜の設置位置の距離は 100 m と一定にした。

次に、両防止膜を併用した時の設置効果について検討する。両防止膜の設置諸元は種々考えられるが、汚濁負荷地点から下流 100 m に防止膜(自立式あるいは垂下式)を設置し、さらにそれより 40 m 下流に防止膜(垂下式あるいは自立式)を設置して、各々の膜高さを変えて計算を行う。

4. 汚濁拡散防止膜の設置効果を表す指標

汚濁拡散防止膜の設置効果を何をもって評価するかは多少議論のあるところである。ここでは、膜の設置目的ができるだけ工事区域外に汚濁を流出させないことであるので、式 (5) で定義されるようにある時刻までに膜設置位置から下流域に流出する汚濁量の、その時刻までに与えた汚濁負荷量に対する比 R (以後流出率と呼ぶ)

$$R = \frac{\int_0^{t_1} \int_{-h}^0 q dz dt - \sum_i \sum_k c_{i,k}(t_1) \Delta x \Delta z}{\int_0^{t_1} \int_{-h}^0 q dz dt} \dots\dots (5)$$

を膜の設置効果を評価する一つの指標とする。ここに、 t_1 は汚濁の負荷開始後からの経過時間、 $c_{i,k}(t_1)$ は時刻 t_1 における (i, k) 地点の濃度である。なお、分子第 2 項は膜設置位置より上流域についてのみ計算を行う。

次に、膜の外へ流出した汚濁は速かに水底に沈降堆積させることが望ましいので、このような観点から膜下流域の汚濁の濃度分布を調べれば、膜の設置効果を評価する上でもう一つの指標となりうる。

ここでは、式 (6) に示すような防止膜を設置しない場合の濃度に対する設置したときの濃度比の分布を求める。

$$c_{i,k} = \frac{C_{i,k}}{C_{0i,k}} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $c_{i,k}$ は防止膜を設置した場合の、また $C_{0i,k}$ は膜を設置しない場合の格子点 (i, k) における濃度である。

5. 計算結果

(1) 自立式防止膜の設置効果

自立式防止膜単独設置の場合の流出率の経時変化および膜の上、下流域における汚濁等濃度比線をそれぞれ図-3 および図-4 に示す。

図-3 から、汚濁負荷開始後 0.5 時間ぐらいから H_a/h の違いによって流出率に差異が見られ、 H_a/h が大きいほど流出率は小さいが、その差は極く僅かである。何れの膜高さでも時間の経過とともに流出率は増大し、1 に漸近する傾向が見られる。これは土砂粒子の沈降速度が極めて小さいためであり、粒子は膜上流域でほとんど沈降しないで、流れに乗ってほとんど全粒子が膜下流域に流出してしまうからであるといえる。

図-4 の等濃度比線図によると、 H_a/h の増大とともに膜下流域では膜のない場合より濃度の高くなる領域が上層部に見られる。汚濁土砂を早く沈降させることが望ましいという観点から判断すれば、自立式防止膜の単独設置では膜高さが高くなるほどかえって設置効果が悪く

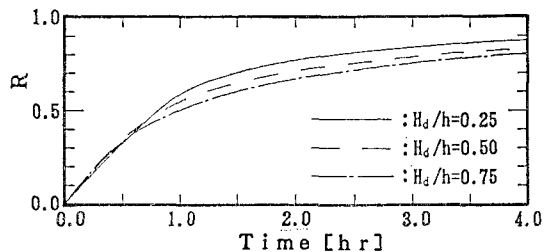
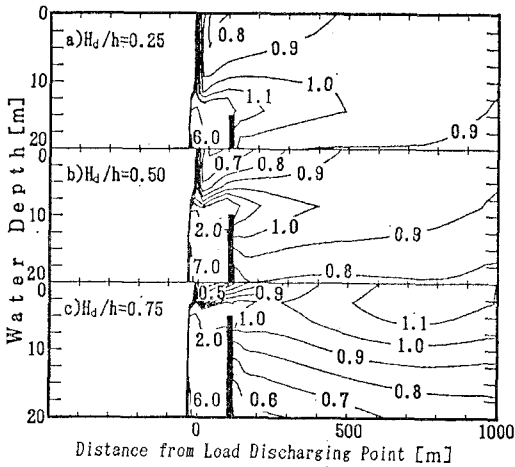
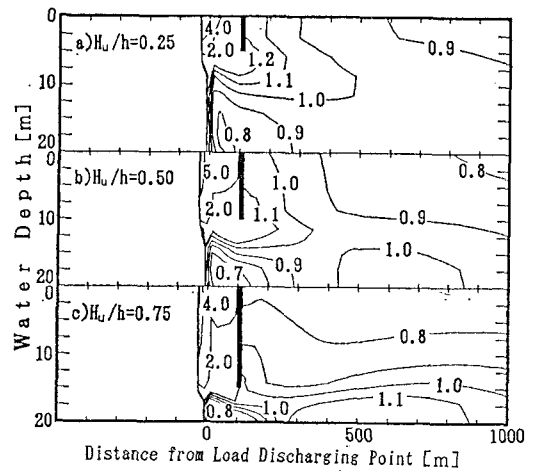


図-3 流出率の経時変化 (自立式防止膜の場合)



図—4 等濃度比線図 (自立式防止膜の場合)



図—6 等濃度比線図 (垂下式防止膜の場合)

なるという結果が生じる。

(2) 垂下式防止膜の設置効果

垂下式防止膜単独設置の場合の汚濁流出率の経時変化および膜の上、下流域における汚濁の等濃度比線図をそれぞれ図—5 および図—6 に示す。

流出率の経時変化については前述の自立式防止膜の場合と同様に、沈降速度が極めて小さいためにほとんど全土砂粒子が流れとともに下流域に流出してしまい、時間の経過とともに $R=1$ に漸近していき、膜高さによる差異は僅少である。

しかし、図—6 の等濃度比線図からは自立式防止膜の場合とは大きく異なった濃度分布の様相が見られる。特に下流域では、 H_u/h が大きくなるほど濃度比の大きな領域が下層部に広く分布するようになる。これは膜の上流側前面で生じる下降流によって汚濁の移流沈降が促進され、さらに膜下方の水平流によって汚濁が下流域の水底付近に移流されるためであると考えられる。

(3) 両防止膜を併用した時の設置効果

ここでは両防止膜の間隔を 40 m と一定にしてそれぞれの防止膜高さのみを変えて 18 通りの計算を行った。以下にその結果を示す。

まず、上流側に自立式防止膜を、下流側に垂下式防止

膜を設置した場合について述べる。

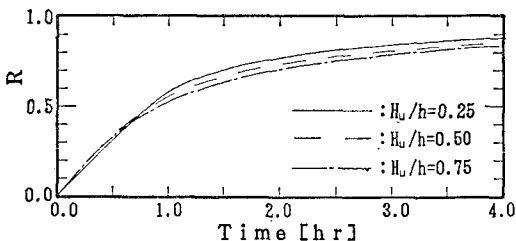
図—7 に、上流側に $H_a/h=1/4$ の自立式防止膜を設置し、下流側に垂下式防止膜を $H_u/h=1/4, 2/4, 3/4$ と高さを変えて設置した時の計算結果を示す。同様に、図—8 は上流側に $H_a/h=2/4$ の、また図—9 は $H_a/h=3/4$ の自立式防止膜を設置したときの結果を示している。

これらのうち、図—7 a), b) と図—8 a) は両防止膜によって投影的に全水深が遮蔽されない場合の計算結果である。これらの図において膜より上流域に着目すると、上層部と下層部で濃度比が 1 より大きい領域が現れ、中層部では 1 より小さい領域が現れることがわかる。図—4 および図—6 の上流域と比較すると、これらの図の上層部および下層部の濃度の高い領域はそれぞれの膜の効果が現れているものと考えることができる。また、中層部の濃度比が 1 より低い領域は、自立式防止膜と垂下式防止膜の間に生じる水平流により下流域への流出が局部的に助長されたためである。

また、両防止膜によって全水深が投影的に遮蔽される場合の上流域の濃度比分布は、下層部ほど濃度が高く自立式防止膜上端よりも上層部では濃度が低くなっており、図—4 と同様の傾向がみられることがわかる。このことは、上流域の汚濁濃度分布は上流側に設置された自立式防止膜の特性に大きく支配されることを示している。

次に、図—7～図—9 の下流域に着目すると、下流域の汚濁濃度分布は下流側に設置した垂下式防止膜の特性に大きく支配されていることがわかる。すなわち、 H_u/h が大きくなるほど垂下式防止膜より下流域の下層部に汚濁濃度の高い領域が分布し、上層ほど汚濁濃度は低くなっている。

次に、上流側に垂下式防止膜を、下流側に自立式防止膜を設置した場合について述べる。



図—5 流出率の経時変化 (垂下式防止膜の場合)

図-10 は上流側に垂下式防止膜を $H_u/h=1/4$ の高さで設置し、下流側に自立式防止膜を $H_d/h=1/4, 2/4, 3/4$ と変えて設置した時の計算結果を示している。また、図-11 および 図-12 はそれぞれ上流側の垂下式防止膜を $H_u/h=2/4, 3/4$ として同様の計算を行なった結果である。

これらのうち、全水深が投影的に遮蔽されない場合の図-10 a), b) および 図-11 a) に着目すると、それらの上流域の汚濁濃度比は上層および下層で1より大きい値を、中間層で1より小さい値を示している。また、下流域に着目すると、中層あるいは下層で濃度比が1より大きくなる領域が現れ、上流側に設置した垂下式防止膜の特性が現れており、前述の上流側に自立式を設けた場合と同様の傾向を示すことがわかる。

一方、図-10～図-12 のうち両防止膜によって全水深が投影的に遮蔽される場合には、それらの上流域では、上層部で濃度が増大し、下層部で低下していることがわかる。また H_u/h が大きくなるほど濃度比の高い領域が広く分布し、垂下式単独設置の場合の図-6 と同様の傾向を示している。したがって、上流域の汚濁濃度分布は上流側に設置された垂下式防止膜の特性が支配的であることがわかる。また、下流域の濃度比の分布に着目すると H_d/h が大きくなるほど下流域に流出した汚濁が水面付近に浮遊し、水底付近には濃度の低い領域が形成される傾向がある。これは、 H_d/h が大きくなると自立式防止膜に沿って上昇流が発達し、汚濁が上層に運ばれるためであると考えられる。特に、両防止膜によって二重に遮蔽される部分が長くなるとこの傾向は顕著になる。このように、下流側に設置された自立式防止膜の膜高さは、下流域の汚濁の分布特性に直接影響を与えることがわかる。

以上を総合すると、自立式と垂下式を併用し、両防止膜によって全水深が投影的に遮蔽されるときは、上流域の汚濁濃度分布は上流側に設置された防止膜の設置効果に、また下流域では下流側に設置された防止膜のそれに強く支配されるといえる。

6. 結 語

本研究は、自立式および垂下式汚濁拡散防止膜の設置効果を鉛直2次元数値シミュレーションによって検討したものである。本研究で得られた結果を要約すると次のようである。

(1) 自立式防止膜を単独に設置したときは、膜高さを高くするほど汚濁を上流域の下層部に滞留させる効果は高まるが、下流域に流出した汚濁は上層部に浮遊する傾向が強くなる。一方、垂下式防止膜を単独に設置したときは膜高さを高くするほど汚濁の沈降を促進し、下流

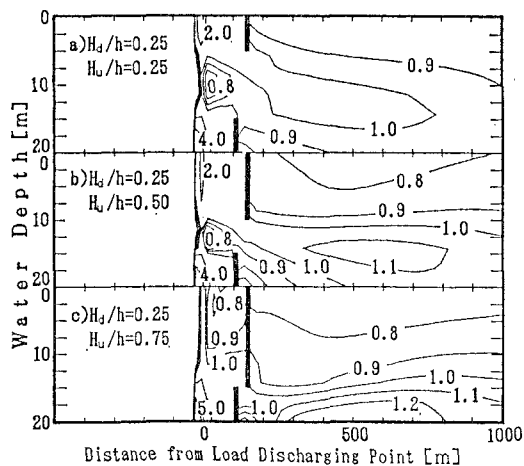


図-7 等濃度比線図 ($H_d/h=1/4$ の場合)

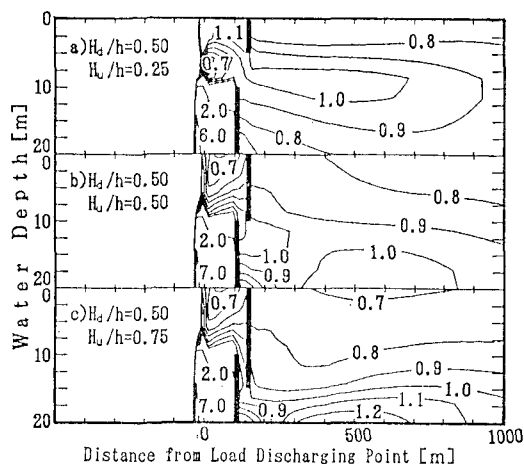


図-8 等濃度比線図 ($H_u/h=2/4$ の場合)

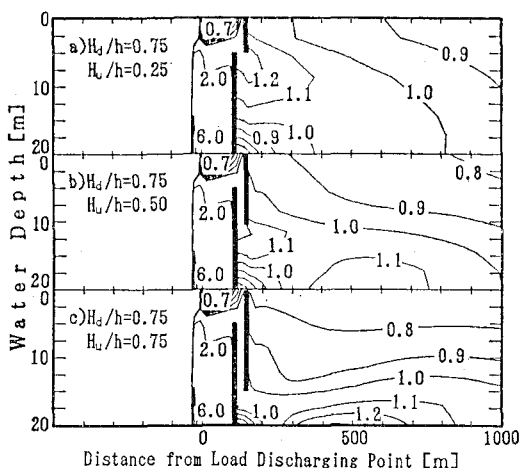


図-9 等濃度比線図 ($H_u/h=3/4$ の場合)

域に流出した汚濁を早く沈降堆積させる効果がある。

(2) 流出率については、対象とした土砂粒子の沈降速度が小さいためほとんど全粒子が膜下流域に流出してしまい、自立式、垂下式による違い、あるいは膜高さによる違いはほとんど認められない。

(3) 両防止膜を併用するときは、両防止膜によって全水深が投影的に遮蔽される場合には膜より上流域の汚濁濃度の分布は主として上流側に設置された防止膜の特性に、また下流域の汚濁濃度分布は主として下流側に設置された防止膜の特性に依存する。ただし、両防止膜によって全水深が投影的に遮蔽されない場合には、下流域の濃度の分布は垂下式防止膜の特性に支配される。

本来、実海域における汚濁拡散防止膜の設置効果を検討するには、潮汐による往復流を対象とし、且つ3次元の取り扱いが必要である。したがって、ここで示した一方向流を対象とした2次元数値シミュレーションの結果をそのまま汚濁防止膜の設置効果として捉えることは早計であると思われる。また、汚濁の発生形態や膜近傍の流況が汚濁の拡散に大きく関与することが予想される。今後はこのような点および流れによる膜の変形などを考慮して膜の設置効果や最適配置について検討を加えたい。

参 考 文 献

- 加納 敬・本城 豊・川本博文 (1987): 半水深二重敷設汚濁防止膜の効果に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 3, pp. 209~214.
- 加納 敬・本城 豊・川本博文 (1989): 大水深用汚濁防止膜の最適敷設法に関する空気流模型実験, 海洋開発論文集, Vol. 5, pp. 239~244.
- 榎木 亨・青木伸一 (1987): 流れの中に張られた汚濁拡散防止膜に及ぼす流体力と有効深さの計算法について, 海洋開発論文集, Vol. 3, pp. 203~208.
- 堀江 毅 (1980): 沿岸海域の水の流れと物質の拡散に関する水理学的研究, 港湾技研資料, No. 360, pp. 102~110.

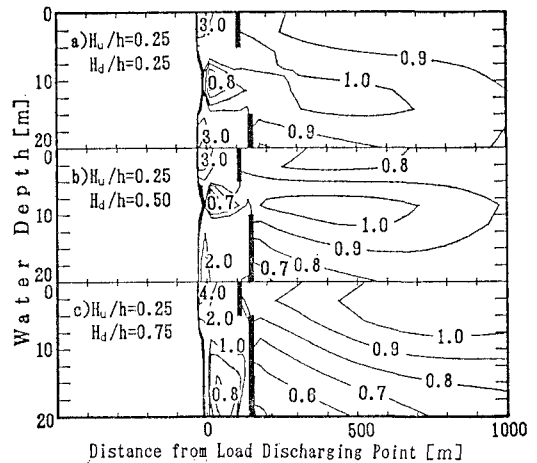


図-10 等濃度比線図 ($H_u/h=1/4$ の場合)

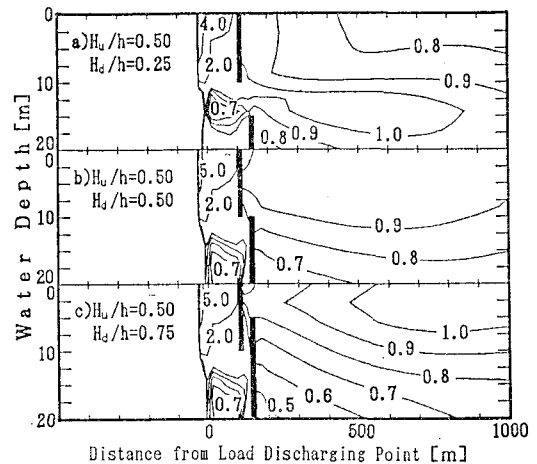


図-11 等濃度比線図 ($H_u/h=2/4$ の場合)

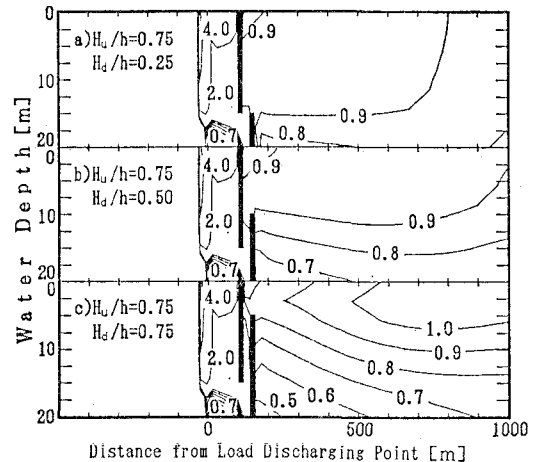


図-12 等濃度比線図 ($H_u/h=3/4$ の場合)