研　究　速　報
UDC 628.192：628.33：614.777(26)：621.85.058.2

海水汚濁拡散防止膜の性能と係留

Performance of Silt Fence and its Mooring

木　下　　健*・関　本　秀　夫**・陳　　活　雄***
Takeshi KINOSHITA, Hideo SEKIMOTO and Ikuo CHIN

1．序

最近の海上工事においては，大規模化，大水深化，施工時間の短縮化が進む一方で，工事が周辺環境に与える影響を評価することがますます重要となってきている．なかでも“濁り”は，工事の直接的影響と考えられるため，その発生，拡散を最小限にくいとめる必要がある．このため，工事による濁りを事前に予測して監視体制に備えると同時に，工事中においては，濁りの進行を予測して工事へのフィードバックや濁り拡散の防止対策を行う必要がある．そこで，汚濁拡散防止膜について模型による拡散防止性能の観察と防止膜の運動と係留張力の研究結果を報告する．

2．汚濁拡散実験について

2.1　波なしの場合

実験方法

長方形の水槽に水を入れ，そこにヘドロを落とし水深と拡散状況の関係，また，ヘドロ濃度と拡散状況との関係について調べた．データは，実験のようすをビデオに収め，拡散状態を何度も繰り返し観察し，結果を得た．

実験用水槽は，100cm×20cm×30cmの大きさである．なお，実験に使用したヘドロ（不忍池のボート池）および関東ロームのデータは表1のとおりである．

2.2　波ありの場合

実験について

Fig. 1に示すような水槽を使用した実験を行った．膜のかわりに，2mm厚のアクリル板を使用した．また，実験のようすはビデオに収め，後で状況を確認した．

表1

材料成分 (mm)	砂 ～0.074	シトル 0.074 ～0.005	粘　土 0.005～	日本統一[1)] 土質分類	原土含水比 (%)	比重
不忍池のヘドロ	16.0%	58.0%	26.0%	OH	312.2	2.43
関東ローム	25.0%	41.0%	34.0%	VH		2.65

2.3　汚濁拡散実験についての考察

汚濁拡散の状況は，真上から垂直に投下した場合，海底面をはうようにして汚濁が拡散する．そのため，防止膜としては膜の位置が海底面まで到達したものでなければ，汚濁を防止することはできない．汚濁水の濃度，種類は拡散の模様に多少影響するが，大きな差はなく豆乳，ポスターカラーで実験上は代用できる．波なしの場合はFig. 2に示すように汚濁拡散高さと水深の比は汚濁水投下量と囲い込み全容量の比による．波のある場合は長波長，大波高の時ほど，汚濁水の拡散は広がり，実際上は膜の位置が水面に達している必要がある．膜が水面に達していない時は壁を固定した場合と，固定していない場合について実験したが，壁を固定した状態の場合，波の力がそのまま壁内にたまった汚水を持ち上げる結果となり，壁を固定しないで波まかせにした状態のほうが，汚濁水を保存する確率が高いことがわかった．これは，おそらく汚濁を拡散させる流れにさからう流れが壁内に発

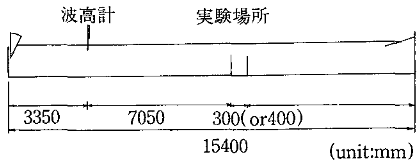

Fig. 1　Wave basir

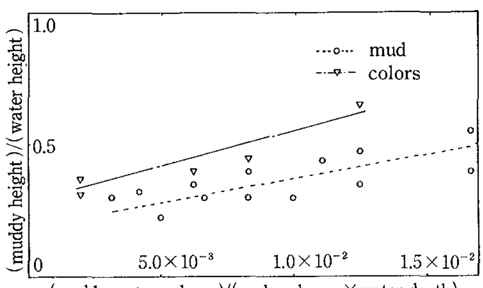

Fig. 2　Muddy water height vs. muddy water volume

*東京大学生産技術研究所　第2部
**ウエイブ，フロンティア，コーナー
***新日本技術コンサルタント

生するためであると思う．固定しない場合は沖側のほうから拡散していくことがわかった．

3．汚濁水拡散防止膜係留機構の模型実験

3.1　係留機構についての実験の目的

係留方式については自由係留・緊張係留等があるが，係留索に非常に大きな衝撃張力を発生させないことが最も重要である．それをさけるため通称“アクアバネ”と呼ばれる中間ブイと中間シンカーを有した係留装置について実験を行った．

このアクアバネ式緊張係留方式は衝撃張力が発生しにくく，潮位変動に順応して係留系は変位するが，その機能はほとんど変化しないという優れた特性を持つ係留機構である．その機能および係留系の運動特性・作用張力等を水理模型実験によって検証する．

3.2　実験用模型

実験は5種類の模型について行った．A型機構（Fig. 3）はつる巻バネ（バネ定数小）の特性を，C型機構（Fig. 4）は重ね板バネ（バネ定数大）の特性を持っている．A型，C型は大波高用に設計したのに対しA-1型（Fig. 5），C-1型（Fig. 6）は中小波高用に設計したものである．また，これから新しく開発された機構と比較するため，自由係留方式（Fig. 7）についても実験した．

フロートの材質は塩化ビニールパイプ（w＝179g/m）を使用している．ワイヤーはステンレス製ワイヤー（直径8mm）を使用し，自由係留方式ではスティール亜鉛メッキチェーン（直径1.0mm）を使用した，防止膜には布を代用し，表面にはラッカーを塗りシルトが通過できないようにした．そして膜は，汚濁水の実験結果を考慮し，静水時に底面まで膜のある状態，すなわち完全遮蔽で行い，鉄棒のおもりを下から5cmの所に設置した．その他フロートの大きさ等を下に示す．

メインフロート：全種類共通
　　長さ456mm　外径28mm　重量108.2g
サブフロート：A，C型
　　長さ284mm　外径26mm　重量95.8g
　A-1，C-1型　1つにつき　A-1型20g　C-1型15g
シンカー（おもり）：A型　長さ27.8mm　重量94.6g
　　C型　長さ27.8mm　重量53.0g
シンカー（おもり）：A-1型　重量47.3g
　　C-1型　重量26.5g

3.3　実験方法

実験装置および測定方法：使用した実験水槽は，Fig. 1の東京大学生産技術研究所の2次元小型水槽であり，長さは15m，幅48cmである．

実験では波浪中における係留装置のワイヤーにかかる索張力をストレインゲージ（小型リングゲージ）で測定した．測定個所はA，C型は4か所，A-1，C-1型

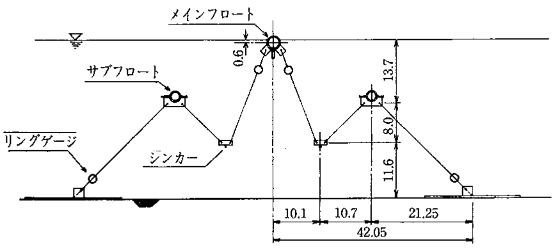

Fig. 3　A型係留断面図　s＝1/4

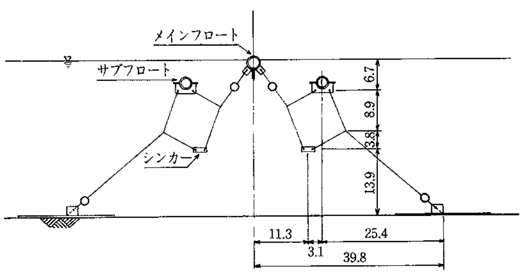

Fig. 4　C型係留断面図　s＝1/4

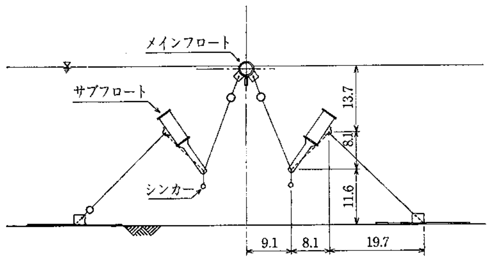

Fig. 5　A-1型係留断面図　s＝1/4

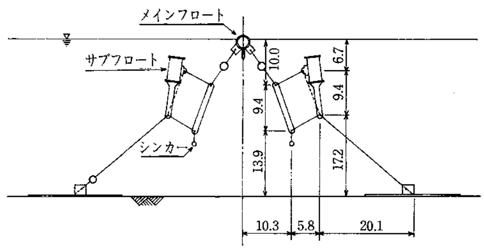

Fig. 6　C-1型係留断面図　s＝1/4

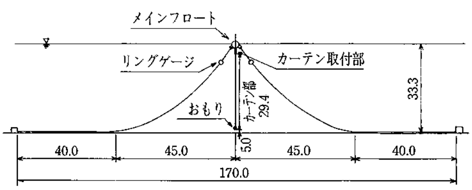

Fig. 7　自由係留式係留機構図　s＝1/10

は３か所，自由係留方式は２か所測定した（機構図参照）．また，メインフロートの動きはビデオカメラを使用して測定した．索張力および波高はデータ・レコーダで記録し，ペンレコーダーにも書かせた．

実験：実験は周期と波高をパラメーターとし，周波数を１～2.5Hzについて0.25Hzごとに，波高は0.8～6.7cmで変化させて各タイプ約30ケース行った．水深は33.3cmである．

解析：フロートの動きは水槽にあらかじめメッシュを刻んである位置で撮影し，フロートの中心の位置の動きを読み取った．索張力の実験結果はミニコンでAD変換したのち，フーリエ係数を求めた．

3.4 理論解析

Fig. 8のように膜が水面から底面までたれているとする．Fig. 9の膜の右側だけの領域について流体運動を考えるとき，線形化された周期運動問題に対する速度ポテンシャルΦの一般解は未知数A_nを使って次式で与えられる[2]．なお膜は板として近似できると仮定する．

$$\Phi(x,y,t)=\mathrm{Real}\{\phi(x,y)e^{i\omega t}\},\ \omega=2\pi/T \qquad (1)$$

$$\phi(x,y)=A_0e^{-k_0x}\cosh k_0(y-h)+\sum_{n=1}^{\infty}A_ne^{-k_nx}\cos k_n(y-h) \qquad (2)$$

where

$$\omega^2/g=k_0\tanh k_0h \qquad (3.1)$$

$$=-k_n\tan k_nh,\quad n=1,2,3\cdots\cdots \qquad (3.2)$$

ここでω，T，hはそれぞれ角周波数，周期，水深である．

1）Radiation問題

放射問題の境界条件は次のとおりである．

［B］　on$=x=0$

swayの場合，板の動揺を

$$X(t)=\mathrm{Real}\ [x_0e^{i\omega t}] \qquad (4)$$

とすれば，次のようになる．

$$\phi_x(0,y)=i\omega x_0,\qquad \text{for}\quad 0\leqq y\leqq h \qquad (5)$$

roll（０点まわり）の場合は，同様に板の動揺を

$$\Theta=\mathrm{Real}\ [\theta_0e^{i\omega t}] \qquad (6)$$

とすれば次のようになる．

$$\phi_x(0,y)=i\omega\theta_0y,\qquad \text{for}\quad 0\leqq y\leqq h \qquad (7)$$

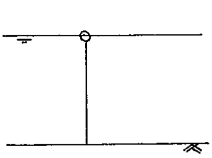

Fig. 8

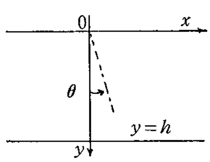

Fig. 9　Coordinate

まず(２)式の両辺に$\cosh k_0(y-h)$，$\cos k_m(y-h)$を掛けて積分する．

$$\int_0^h\phi\cosh k_0(y-h)\,dy=A_0e^{-ik_0x}\int_0^h\cosh^2k_0(y-h)\,dy+\sum_{n=1}^{\infty}A_ne^{-k_nx}\int_0^h\cos k_n(y-h)\cos k_0(y-h)\,dy \qquad (8)$$

$$\int_0^h\phi\cosh k_m(y-h)\,dy=A_0e^{-ik_0x}\int_0^h\cosh k_0(y-h)\cos k_m(y-h)\,dy+\sum_{n=1}^{\infty}A_ne^{-k_nx}\int_0^h\cos k_n(y-h)\cosh k_m(y-h)\,dy \qquad (9)$$

今，

$$\int_0^h\cosh k_n(y-h)\cos k_m(y-h)\,dy=0\quad \text{for } n\neq m$$

であるから，

$$\int_0^h\phi\cosh k_0(y-h)\,dy=A_0e^{-ik_0x}I_0^{(1)} \qquad (10)$$

$$\int_0^h\phi\cos k_n(y-h)\,dy=A_ne^{-k_nx}I_n^{(1)} \qquad (11)$$

where

$$I_0^{(1)}=\int_0^h\cosh^2k_0(y-h)\,dy \qquad (12)$$

$$I_n^{(1)}=\int_0^h\cos^2k_n(y-h)\,dy \qquad (13)$$

ここで$x=0$での境界条件も両辺に$\cosh k_0(y-h)$，$\cos k_m(y-h)$を掛けて積分する．

$$\int_0^h\phi_x\cosh k_0(y-h)\,dy=-ik_0A_0I_0^{(1)} \qquad (14)$$

$$\int_0^h\phi_x\cos k_n(y-h)\,dy=-k_nA_nI_n^{(1)} \qquad (15)$$

であるから

swayに対しては

$$i\omega x_0I_0^{(2)}=-ik_0A_0^sI_0^{(1)},\ i\omega x_0I_0^{(2)}=-k_nA_n^sI_n^{(1)} \qquad (16)$$

where

$$I_0^{(2)}=\int_0^h\cosh k_0(y-h)\,dy \qquad (17)$$

$$I_0^{(2)}=\int_0^h\cos k_n(y-h)\,dy \qquad (18)$$

$$\therefore\quad A_0^s=-\frac{\omega x_0I_0^{(2)}}{k_0I_0^{(1)}},\ A_n^s=\frac{i\omega x_0I_n^{(2)}}{k_nI_n^{(1)}} \qquad (19)$$

rollに対しては

$$i\omega\theta_0I_0^{(3)}=-ik_0A_0^rI_0^{(1)},\ i\omega\theta_0I_n^{(3)}=-k_nA_n^rI_n^{(1)} \qquad (20)$$

where

$$I_0^{(3)}=\int_0^hy\cosh k_0(y-h)\,dy \qquad (21)$$

$$I_n^{(3)}=\int_0^hy\cos k_n(y-h)\,dy \qquad (22)$$

$$\therefore \quad A_0^r = -\frac{\omega\theta_0 I_0^{(3)}}{k_0 I_0^{(1)}}, \quad A_n^r = \frac{i\omega\theta_0 I_n^{(3)}}{k_n I_n^{(1)}} \tag{23}$$

流体力をReal$\{P^s e^{i\omega t}\}$，Real$\{Q^s e^{i\omega t}\}$とすると，板の両面のポテンシャルの反対称性と法線の向きを考慮して，

$$\begin{aligned} P^s e^{i\omega t} &= i\rho\omega e^{i\omega t}\int_0^h \phi(0,y)\,dy \times 2 \\ &= 2i\rho\omega e^{i\omega t}\int_0^h \{A_0^s \cosh k_0(y-h) \\ &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} A_n^s \cos k_n(y-h)\}\,dy \\ &= -2i\frac{\rho\omega^2 x_0 (I_0^{(2)})^2}{k_0 I_0^{(1)}} e^{i\omega t} \\ &\quad + 2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\rho\omega^2 x_0 (I_n^{(2)})^2}{k_n I_n^{(1)}} e^{i\omega t} \end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned} \mathrm{Real}[P^s e^{i\omega t}] &= -\left\{2\rho\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(I_0^{(2)})^2}{k_n I_0^{(1)}}\right\}\ddot{X} \\ &\quad -\left\{2\rho\omega\frac{(I_0^{(2)})^2}{k_0 I_0^{(1)}}\right\}\dot{X} \end{aligned} \tag{25}$$

同様に，

$$\begin{aligned} \mathrm{Real}[Q^r e^{i\omega t}] &= -\left\{2\rho\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(I_0^{(3)})^2}{k_n I_n^{(1)}}\right\}\ddot{\theta} \\ &\quad -\left\{2\rho\omega\frac{(I_0^{(3)})^2}{k_0 I_0^{(1)}}\right\}\cdot\theta \end{aligned} \tag{26}$$

同様に連成流体力も求められる．

sway運動中のrollモーメントをReal$\{Q^{rs} e^{i\omega t}\}$とすると，

$$m_s \equiv \frac{1}{\omega^2 x_0 \rho\pi h^2/4}\mathrm{Real}[P^s] = \frac{8}{\pi h^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{k_n}\cdot\frac{(I_n^{(2)})^2}{I_n^{(1)}} \tag{27}$$

$$\begin{aligned} n_s &\equiv \frac{-1}{\omega^2 x_0 \rho\pi h^2/4}\mathrm{Imag}[P^s] \\ &= \frac{8}{\pi h^2}\cdot\frac{1}{k_0}\cdot\frac{(I_0^{(2)})^2}{I_0^{(1)}}, \quad n_s' \equiv n_s\frac{\omega}{\sqrt{g/h}} \end{aligned} \tag{28}$$

$$m_r \equiv \frac{1}{\omega^2 \theta_0 \rho\pi h^4/4}\mathrm{Real}[Q^r] = \frac{8}{\pi h^4}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{k_n}\cdot\frac{(I_n^{(3)})^2}{I_n^{(1)}} \tag{29}$$

$$\begin{aligned} n_r &\equiv \frac{-1}{\omega^2 \theta_0 \rho\pi h^4/4}\mathrm{Imag}[Q^r] \\ &= \frac{8}{\pi h^4}\cdot\frac{1}{k_0}\cdot\frac{(I_0^{(3)})^2}{I_0^{(1)}}, \quad n_r' \equiv n_s\frac{\omega}{\sqrt{g/h}} \end{aligned} \tag{30}$$

$$\begin{aligned} m_{sr} &\equiv \frac{1}{\omega^2 \theta_0 \rho\pi h^3/4}\mathrm{Real}[P^{sr}] = m_{sr} \\ &\equiv \frac{1}{\omega^2 x_0 \rho\pi h^3/4}\mathrm{Real}[Q^{rs}] = \frac{8}{\pi h^3}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{k_n}\cdot\frac{I_n^{(2)} I_n^{(3)}}{I_n^{(1)}} \end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{aligned} n_{sr}' &\equiv \frac{-1}{\omega\theta_0\rho\pi h^3/4\sqrt{g/h}}\mathrm{Imag}[P^{sr}] \\ &= n_{rs}' \equiv \frac{-1}{\omega x_0 \rho\pi h^3/4\sqrt{g/h}}\mathrm{Imag}[Q^{rs}] \\ &= \frac{8}{\pi h^3}\cdot\frac{1}{k_0}\cdot\frac{I_0^{(2)} I_0^{(3)}}{I_0^{(1)}}\cdot\frac{\omega}{\sqrt{g/h}} \end{aligned} \tag{32}$$

2）Diffraction問題

散乱問題は，入射波が板で全反射するので解は自明である．a_wを入射波の振幅とすると，入射ポテンシャル，散乱ポテンシャルは次のように表される．

$$\Theta_0(x,y,t) = \mathrm{Real}\left\{\frac{iga_w}{\omega}\phi_0(x,y)\,e^{i\omega t}\right\} \tag{33}$$

$$\phi_0(x,y) = \frac{\cosh k_0(y-h)}{\cosh(k_0 h)} e^{ik_0 x} \tag{34}$$

$$\Theta_d(x,y,t) = \mathrm{Real}\left\{\frac{iga_w}{\omega}\phi_d(x,y)\,e^{i\omega t}\right\} \tag{35}$$

$$\phi_d(x,y) = \frac{\cosh k_0\ (y-h)}{\cosh(k_0 h)} e^{-ik_0 x} \tag{36}$$

波強制力$F^s e^{i\omega t}$，強制モーメント$M^r e^{i\omega t}$は，

$$\begin{aligned} F^s e^{i\omega t} &= i\rho\omega\int_0^h \frac{iga_w}{\omega}\{\phi_0(0,y)\} + \phi_d(0,y)\}\,e^{i\omega t}dy \\ &= -\frac{2\rho g a_w}{\cosh(k_0 h)} I_0^{(2)} e^{i\omega t} \end{aligned} \tag{37}$$

同様に，

$$M^r e^{i\omega t} = -\frac{2\rho g a_w}{\cosh(k_0 h)} I_0^{(3)} e^{i\omega t} \tag{38}$$

$$\overline{F}^s \equiv \frac{F^s}{\rho g h a_w} = -\frac{2}{h}\cdot\frac{I_0^{(2)}}{\cosh(k_0 h)} \tag{39}$$

$$\overline{M}^r \equiv \frac{M^r}{\rho g h^2 a_w} = -\frac{2}{h^2}\cdot\frac{I_0^{(3)}}{\cosh(k_0 h)} \tag{40}$$

3）　運動方程式

運動方程式はは次のように表される．

$$\begin{aligned} &(M+M_s)\ \ddot{X} + N_s\dot{X} + k_s X + M_{sr}\ddot{\theta} + N_{sr}\dot{\theta} \\ &= F^s\cos\omega t \end{aligned} \tag{41}$$

$$(I+M_r)\ddot{\theta} + N_r\dot{\theta} + K_r\theta + M_{rs}\ddot{X} + N_{rs}\dot{X} = M^r\cos\omega t \tag{42}$$

ここでM，Iは質量，慣性モーメントであり，M_s，M_rは付加質量，付加慣性モーメント，N_s，R_r造波減衰力係数，K_s，K_rは復元力係数，M_{sr}，M_{rs}，N_{sr}，N_{rs}は連成流体力である．無次元の運動方程式は次のようになる．

$$\begin{aligned} &-\omega'^2\ \frac{\pi}{4}(m+m_s)\ddot{x} + i\omega'\frac{\pi}{4}n_s'\dot{X} \\ &\quad + K_s' x - \omega'^2\ \frac{\pi}{4}m_{sr}\ddot{\theta} + i\omega'\frac{\pi}{4}n_{sr}'\dot{\theta} = \overline{F}^s\cos\omega t \end{aligned} \tag{43}$$

$$\begin{aligned} &-\omega'^2\ \frac{\pi}{4}(I'+mr)\ddot{\theta} + i\omega'\frac{\pi}{4}n_r'\dot{\theta} \\ &\quad - \omega'^2\ \frac{\pi}{4}m_{rs}\ddot{x} + i\omega'\frac{\pi}{4}n_{rs}'\dot{x} = \overline{M}^r\cos\omega t \end{aligned} \tag{44}$$

$$\begin{aligned} &x = \frac{X}{a_w},\quad \theta = \frac{\Theta}{a_w/h},\quad \omega'^2 = \frac{\omega^2}{g/h}, \\ &\quad m = \frac{M}{\rho\pi h^2/4},\quad I' = \frac{I}{\rho\pi h^4/4},\quad K_s' = \frac{K_s}{\rho g h} \end{aligned} \tag{45}$$

ここで，r，r_1，r_2は円筒の半径，円径，外径である．

Ksの値：理論解析のKsの値は実測結果によった．

張力：各点の張力は静的な変位との関係から求め，サブフロート等の動的影響は考慮していない．

（1987年7月24日受理）

参 考 文 献

1）赤井浩一：土質力学（朝倉土木工学講座5），朝倉書店

2）Milgram, J.H.: Active Water-Wave Absorbers, J.F.M. Vol. 43, pp. 845-859, 1970