鉛直板による係留船舶の長周期動揺低減効果に関する理論的検討

九州大学大学院工学府　学生員　○小野貴也
九州大学大学院工学研究院　正会員　吉田明徳　山城　賢
(株)三洋コンサルタント　正会員　西井康浩

1.まえがき

港湾に係留された船舶（浮体）の長周期動揺は，1～3 分程度の固有周期を有し，外洋から何らかの原因で発生した長周期波の影響を受けて共振を生じ，係留索の切断や荷役への支障を生じることがある．このため，長周期動揺を低減させることを目的に，これまでも種々の観点からの対策法が考案され検討されてきている．最近，谷垣ら[1)]は接岸時船舶の長周期動揺に関する水槽実験において，船体の前後に岸壁から鉛直板を出すと長周期動揺が大きく低減することを報告している．本論文は，この低減の効果を理論的に究明することを目的に行ったものである．基礎的な検討として，直線状岸壁に係留されている矩形浮体を対象に，ポテンシャル接続法の選点解法を用いて，Diffraction 問題と Radiation 問題を解き，波浪強制力，付加質量，造波減衰力を求める．得られた結果を遅延関数法に用いて，設定した係留索と防舷材で係留された浮体の動揺解析を行い，鉛直板の有無による動揺低減効果を検討した．

2.理論の概要

2.1 基本仮定

図-1 に示すように，一定水深ｈの海域において，矩形浮体（短軸長 2a，長軸長 2b，吃水 qh）が岸壁に係留され，長周期動揺の低減装置として，図中に示すような鉛直板が浮体の前後に岸壁と垂直に設置されている場合を考える．流体域を平面境界が ∂D_1 で浮体底面下の領域(2)，浮体側面より外で，二つの鉛直版 ∂D_2 と ∂D_4 および図に示す仮想の境界面 ∂D_3 で囲まれる領域(3)，およびその外側の領域(1)の 3 領域に分割する．Radiation 問題では，浮体動揺の各モード (j=1,2,3,4,5,6) のポテンシャルを $\phi^{(j)}(x,y,z)$ で表す．Diffraction 問題では，j=0 が直線岸壁のみがある場合の入・反射波のポテンシャル，j=7 が鉛直板と固定浮体による散乱波のポテンシャルを意味し，波浪場のポテンシャルは $\phi^{(0)}+\phi^{(7)}$ で表せるものとする．

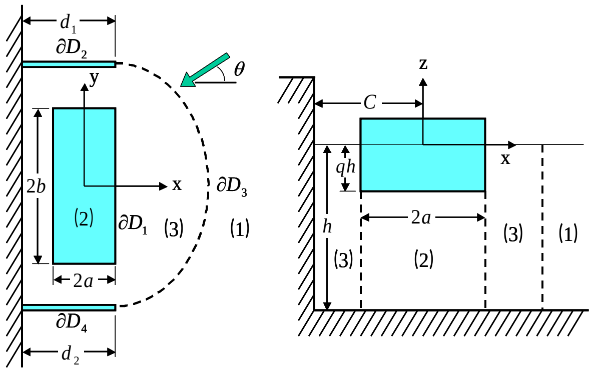

図-1　定義図

2.2 ポテンシャル接続法

入射波と岸壁で完全反射した反射波の重合したポテンシャル関数 $\phi^{(0)}(x,y,z)$ は次式で表される．

$$\phi^{(0)}(x,y,z)=\frac{g\zeta^{(0)}}{\sigma}\left[-i\cdot\exp\left\{-i(kx\cos\theta+ky\sin\theta)\frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh}\right\}\right]$$
$$+\frac{g\zeta^{(0)}}{\sigma}\left[-i\cdot\exp\left\{i(k(2C+x)\cos\theta-ky\sin\theta)\frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh}\right\}\right]$$

式中の k は，分散方程式で与えられる入射波の波数である．また，ラプラスの式，自由表面条件（領域(1)と領域(3)），水底条件，浮体底面での境界条件（領域(2)）を満足する領域(1)～(3)のポテンシャルは以下のように固有関数展開によって表すことができる．

$$\phi_1^{(j)}(x,y,z)=\frac{g\zeta^{(j)}}{\sigma}\left[f_1^{(0)}(x,y)Z_1^{(0)}(z)+\sum_{n=1}^{\infty}f_1^{(n)}(x,y)Z_1^{(n)}(z)\right]$$

$$\phi_3^{(j)}(x,y,z)=\frac{g\zeta^{(j)}}{\sigma}\left[f_3^{(0)}(x,y)Z_1^{(0)}(z)+\sum_{n=1}^{\infty}f_3^{(n)}(x,y)Z_1^{(n)}(z)\right]$$

$$\phi_2^{(j)}(x,y,z)=\frac{g\zeta^{(j)}}{\sigma}\left[\varphi^{(0)}(x,y)Z_2^{(0)}(z)+\sum_{s=1}^{\infty}\varphi^{(s)}(x,y)Z_2^{(s)}(z)\right]+\phi_2'^{(j)}(x,y,z)$$

上式で $f_1^{(n)}(x,y)$，$f_3^{(n)}(x,y)$，$\varphi^{(s)}(x,y)$ はポテンシャルの平面分布を表し，それぞれヘルムホルツの方程式を満足すべき関数であり，$Z_1^{(n)}(z)$ と $Z_2^{(s)}(z)$ はポテンシャルの鉛直分布を表す固有関数である．また，$\phi_2'^{(j)}(x,y,z)$ は浮体の動揺モードに対応する領域(2)の特解である．

ここで，**図-2** のように直線護岸を鏡面とする鏡像領域を考え，この領域に対してグリーンの定理を用

い，さらに領域(1)では無限遠方における radiation 条件を用いると，各領域の未知量 $f_1^{(n)}$，$f_3^{(n)}$，$\varphi^{(s)}$と，その法線微分値$\overline{f_1^{(n)}}$，$\overline{f_3^{(n)}}$，$\overline{\varphi^{(s)}}$に関する積分方程式が得られる．一方，各領域の境界面において成り立つべき流体運動の連続条件からも未知量 $f_1^{(n)}$，$f_3^{(n)}$，$\varphi^{(s)}$が満たすべき関係式が得られる．これらの関係式を連立して数値的に解くことによって未知量を定めることができる．

[選点解法による未知量の算定]

いま，**図-3** に示すように，各境界線を小要素ΔS_iに分割し，未知量 $f_1^{(n)}$，$f_3^{(n)}$，$\varphi^{(s)}$は要素上で一定と仮定する．かつ鉛直方向にΔS_iの幅の帯状の面を取り，浮体側面ではM_1個，領域(2)と(3)の境界面をM_2個，鉛直板および仮想境界面では $M_3(=M_1+M_2)$ 個に分割する．面要素の中点を要素ΔS_iの位置と鉛直方向の位置 p との組(i,p)で表し，これらの点でのみ境界条件が成り立つと仮定し，これに上述のグリーンの定理より得られる関係式を用いると，各要素上の未知量 $f_1^{(n)}(j)$，$f_3^{(n)}(j)$，$\varphi^{(s)}(j)$に関する一次関係式が得られる．これを連立して解くことで，浮体が流体より受ける力を算定することができ，付加質量と造波減衰力が求められる．

2.3 遅延関数法

浮体動揺の計算には，動揺によって生じる波が浮体に及ぼす波力を，遅延関数を用いて記述した下記の運動方程式を解く方法（遅延関数法）を用いた[2)]．

$$\sum_{i=1}^{6}\left(m_{ii}+M_{ij}(\infty)\right)\ddot{x}_i(t)+\sum_{i=1}^{6}\left(\int_{-\infty}^{t}L_{ij}(t-\tau)\dot{x}_i(\tau)d\tau+D_{ij}\dot{x}_i(t)\right)$$
$$+\sum_{i=1}^{6}\left(C_{ij}+G_{ij}\right)x_i(t)=F_j(t)\quad(j=1\ldots6)$$

ここで，m_{ij}は質量および慣性モーメント，C_{ij} は復元力，D_{ij} は粘性減衰係数，G_{ij} は係留系の剛性マトリクス，$F_{ij}(t)$ は入・反射波が浮体に作用する波強制力を表す．また，$M_{ij}(\infty)$ は浮体の動揺によって引き起こされる無限流体中での付加質量（不変付加質量）を表し，$L_{ij}(t)$ は遅延関数と呼ばれ，$t=0$での流場の擾乱がt時間後の波力にどのように影響するかを表す関数である．

$L_{ij}(t)$ および $M_{ij}(\infty)$ はそれぞれ次式で表せる．

$$L_{ij}(t)=\frac{2}{\pi}\int_0^{\infty}N_{ij}(\sigma)\cos\sigma t d\sigma$$

$$M_{ij}(\infty)=M_{ij}(\sigma_0)+\frac{1}{\sigma_0}\int_0^{\infty}N_{ij}(t)\sin\sigma t dt$$

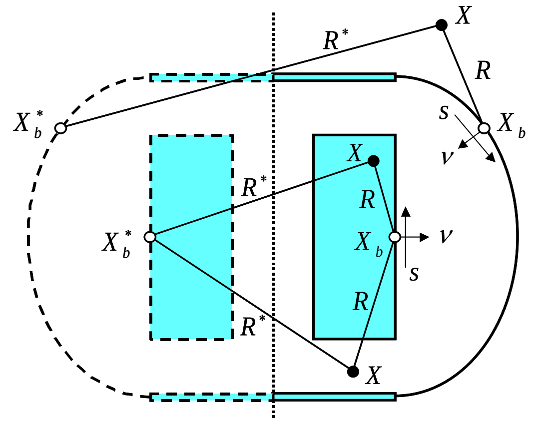

図-2　鏡像領域の図

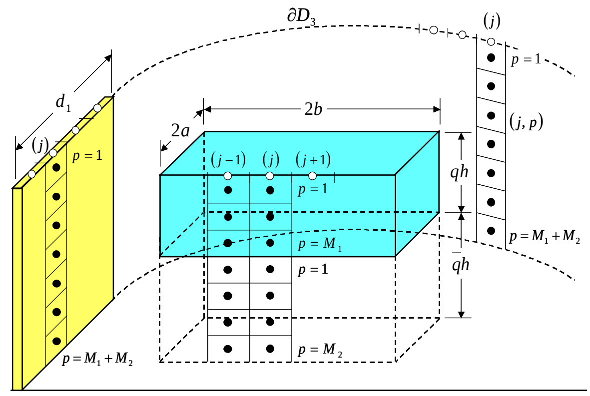

図-3　境界面と選点の分割

ここで，$M_{ij}(\sigma_0)$は周波数σ_0に対する付加質量を表し，$N_{ij}(\sigma)$ は造波減衰力を意味する．周波数成分ごとに Diffraction 問題を解いて波浪強制力を算定し，Radiation 問題を解いて各モードごとに付加質量と造波減衰力を算定する．得られた造波減衰力より遅延関数を算定し，その遅延関数と付加質量を用いて不変付加質量を算定した後，これらを運動方程式に用いて時間領域で浮体動揺を解くことになる．運動方程式の解法にはニューマークのβ法を用いた．

3.あとがき

鉛直板の種々の条件についての動揺解析を現在行っており，検討結果は講演時に述べる予定である．

参考文献

1) 谷垣ら：遮蔽構造による長周期動揺対策の検討, 海洋開発論文集, Vol.22,pp157-162 (2006)

2）眞鍋尚：遅延関数を用いた浮体の動揺シミュレーション，富士総研技報，Vol.8 No.1 PP.116-131 (2003)