

1. まえがき

一般に、海洋の波の運動は表面付近でもっとも大きいので、波を遮蔽するには、表面付近の波をとめれば大部分目的が達せられる事になる。このような見地から、カーテンウォール（水面上から水中に突き出した鉛直板）による防波堤が提案され、この特性についても研究が進められており、反射率・透過率などについて明らかにされている。しかし、このような透過性の防波堤の場合、波の透過率そのものよりも、透過して来た波によるタンカー等の船体運動が、荷役限界等に関連して重要な問題となる場合がある。現在、このような透過性防波堤背後の船体動揺を、防波堤の効果および船体自身の動揺によって発生する波の効果まで考慮して解析した例は無いようである。本報告は、この問題に対してグリーン公式による境界積分方程式法¹⁾を適用した結果について述べたものである。

2. 理 論

図-1に示すように、水深 h の水域の右端を不透過鉛直壁、左端を入射波と反射波の通る仮想面とする。この水域内部に水面上から水中に突き出した固定構造物（カーテンウォール）があり、その右方に自由浮体（タンカー etc.）があって、この浮体は、仮想面を通して入射してくる波によって自由表面上で運動しているものとする。速度ポテンシャルの存在を仮定し、式(1)のように置く。また、仮想面 S_I では、入射波と反射波のみが存在するものとし、式(2)のように置く。

$$\phi(x, z, t) = \frac{ga_0}{\omega} \cdot \phi(x, z) e^{i\omega t} \quad (\text{in } \Omega) \quad (1)$$

$$\phi(x, z) = (e^{-ikx} + Kr e^{ikx}) \cdot C_H(z) \quad (\text{on } S_I) \quad (2)$$

ここに、 a_0 ：入射波振幅、 ω ：入射波の角速度、

ϕ ：無次元化ポテンシャル、 k ：波数、 Kr ：複素

反射率、 $C_H(z) = \cosh k(h+z)/\cosh kh$

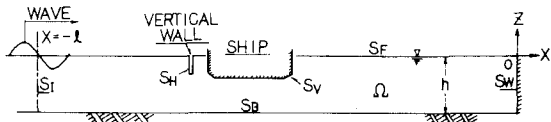


図-1 座標系の定義

速度ポテンシャル ϕ に関する基礎方程式は2次元ラプラス方程式、境界条件は通常の線型化された境界条件である。図-1の各境界を線分に分割し、各要素上でポテンシャル値を一定とすると、グリーンの公式を離散化表示し、境界条件を適用する事により、次の複素係数連立1次方程式を得る。

$$\begin{aligned} \pi \phi_i = & \sum_j \frac{(A_{ij}\Gamma - A_{zij}) \Delta S_j \cdot \phi_j}{s_p} - \sum_j \frac{(n_{xj} A_{xij} + n_{zj} A_{zij}) \Delta S_j \phi_j}{s_v + s_b} + \sum_j \frac{A_{zij} \Delta S_j \phi_j}{s_b} - \sum_j \frac{A_{xij} \Delta S_j \phi_j}{s_w} \\ & + Kr \sum_m \frac{(-ikA_{im} + A_{xim}) e^{-ik\ell} \Delta S_m \cdot C_H(Z_m)}{s_r} + \sum_j \frac{A_{ij} \Delta S_j \{ (i\Gamma/a_0) \{ (n_{xj}\xi + n_{zj}\zeta) - (n_{xj}(Z_j - \bar{Z}_0) \\ & - n_{zj}(X_j - \bar{X}_0)) \} \theta \}}{s_r} + \sum_m \frac{(ikA_{im} + A_{xim}) e^{ik\ell} \Delta S_m C_H(Z_m)}{s_r} \quad (i=1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (3)$$

また、浮体の運動方程式より次式を得る。

$$\omega^2 V \xi = i g a_0 \sum_j n_{xj} \Delta S_j \phi_j \quad \dots \quad (4) \quad \omega^2 V \zeta = i g a_0 \sum_j n_{zj} \Delta S_j \phi_j \quad \dots \quad (5)$$

$$\omega^2 I_M \theta = i \rho g a_0 \sum_j \{ (X_j - \bar{X}_0) n_{zj} - (Z_j - \bar{Z}_0) n_{xj} \} \Delta S_j \cdot \phi_j + \rho g V \{ \ell_0^3/12 V - (Z_0 - Z_b) \} \theta \quad \dots \quad (6)$$

ここに、 ΔS_j ：線分の長さ、 $\Gamma = \omega^2/g$ 、 $A_{ij} = -\ell \log r_{ij}$ 、 $A_{xij} = (X_i - X_j)/r_{ij}^2$ 、 $A_{zij} = (Z_i - Z_j)/r_{ij}^2$ 、 n_{xj} 、 n_{zj} ：それぞれ単位法線ベクトルの成分、 ξ 、 ζ 、 θ ：それぞれ浮体の複素動揺振幅、 V ：浮体の吃水下面積、 I_M ：浮体の慣性モーメント、 $(\bar{X}_0, \bar{Z}_0)$ ：浮体重心の平均座標、 ℓ_0 ：浮体の幅、 Z_b ：浮心の Z 座標、 r_{ij}

： i 点と j 点の距離である。ただし、 $A_{ii} = \log(4S_i/2) - 1$ 、 $A_{xii} = A_{zii} = 0$ である。

式(3)～(6)を連立して解く事により、未知ポテンシャル ϕ_j および運動振幅 ξ 、 ζ 、 θ が得られる。浮体の各時刻における位置と姿勢は次のように決定される。浮体の任意点の座標を浮体重心上に原点をとった局所座標系で (X', Z') とし、重心まわりの回転 δ による移動後の座標を (X'', Z'') とすると、これらの間には式(7)が成り立つ。

$$\begin{pmatrix} X'' \\ Z'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X' \\ Z' \end{pmatrix} \quad \dots (7)$$

また、Sway・Heave などによって重心そのものが平行移動しているので、この平行移動分を (X'', Z'') に重ねれば、浮体の 3 自由度運動による浮体任意点の移動後の位置が決まる。

3. 結果と考察

カーテンウォール堤背後の船体動揺を解析する前に、本計算法の妥当性をチェックする意味で、単純なモデル（鉛直壁前面の浮体）に関して計算を行った。この計算結果は省略するが、本解析法による計算結果は物理現象と良く一致しており、信頼に足るものであることがわかった。

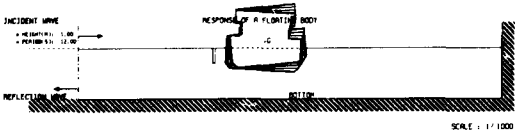
カーテンウォールがある場合については、カーテンウォールの長さ d と水深 h の比 d/h が、0.3、0.4、0.5 の場合の計算例について示す。図－2 は $d/h = 0.3$ 、周期 12 秒の場合の船体動揺を 1 周期を 10 等分し、各時刻における位置をプロットして表わした例である。3 自由度（Sway, Heave, Roll）運動の連成の結果、片揺現象を呈しているのが良くわかる。このような計算を種々の入射波に対して行い、船体の動揺特性を求めた 1 例を図－3 に示す。これは、Heave に対する周波数応答特性を示しており、図中、実線、点線、1 点鎖線はそれぞれ $d/h = 0.3$ 、0.4、0.5 に対応している。図からわかるように、いくつかのするどいピークを持つ周波数特性を示している。また、応答がほとんど 0 となる波無し周期が存在する事がわかる。

これらは、いずれも鉛直板 1 枚による波の透過特性に見られる事であり、入射波、反射波、放射波の位相効果によるものである。これで見るかぎり、カーテンウォールの長さの効果はあまりないが、 $\omega = 0.7$ 付近のピーク値は d/h が大きくなるに従って小さくなる事がわかる。

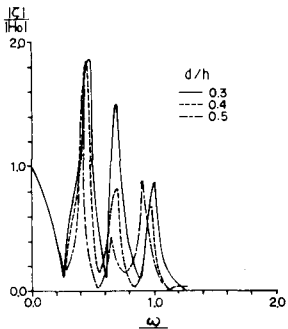
このグラフに見るように、鉛直板 1 枚によるカーテンウォール堤の防波機能は、入射波周期に対してかなり不安定であり、防波堤背後の船体動揺も特定の周期の波に対しては大きくなる事が予想される事がわかった。

4. あとがき

境界積分方程式法を応用して、1 枚の鉛直板背後の船体動揺を解析したが、1 枚の場合大きな遮蔽効果は期待できないようである。このために 2 枚、3 枚の鉛直板を入れる事も考えられるが、これについては今後検討して行きたい。いずれにしても、このような問題に対して、今回用いたグリーン公式による境界積分方程式法は非常に有効な手法と言えよう。



図－2 船体動揺図



図－3 Heave の周波数特性