

ブシネスクモデルの波浪場より算定された波強制力の安定性に関する検討

九州大学大学院工学部 学生会員 ○太田一行 安芸友裕
 (株)三洋コンサルタント 正会員 西井康浩 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

1. まえがき

著者らは、ブシネスクモデルによる港湾内波浪場の推定から、遅延関数法を用いる港湾内係留船舶の動揺解析までを一貫しておこなう動揺解析システムの開発を行っている。港湾内波浪場の推算結果を係留船舶の動揺計算に精度よく引き継ぐには、船体に作用する波強制力を波浪場の推算結果から妥当に算定することが必要である。このため著者ら¹⁾は、ブシネスクモデルによる波浪場の解析結果を用いて、船体に作用する波強制力を算定する手法を提示した。

本手法では、ブシネスクモデルによる波浪場（入射波の波浪場）より船体境界周りの入射波ポテンシャルを算定するために、船体を囲む任意の閉領域（計算領域）を設定するが、数値計算上、その取り方（領域の形状と大きさ）によって波強制力の算定値が変動することも考えられる。また、船体と岸壁との離岸距離が極端に小さくなると、計算値が発散する場合があることから、精度よい動揺推定を行うためには、計算領域の設定および接岸距離による波強制力の変動の程度を明らかにしておく必要がある。

本研究は、上述した、計算領域や離岸距離などの条件に対する、計算の精度や解の安定性について、詳細な検討を行うことを目的とする。

2. 波強制力の算定法の概略

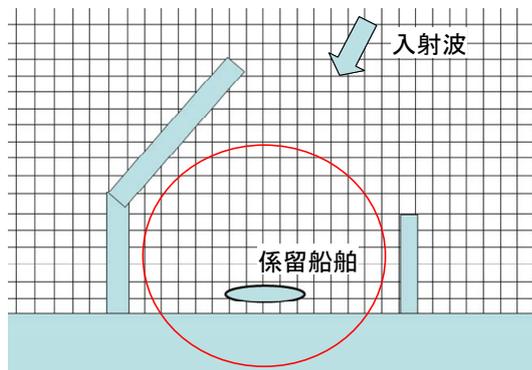


図-1 計算領域（ブシネスクモデル）

図-1に示すような港湾内の岸壁に接岸している浮体について考える。図に示すような格子をきり、港湾形状を表現してブシネスク方程式を用いた波浪計算が行われる。波の場の計算では浮体は考慮しない。

波強制力は、船体が動揺せず固定状態にあると考えたとき、波浪場が船体に及ぼす波力を意味する。ここ

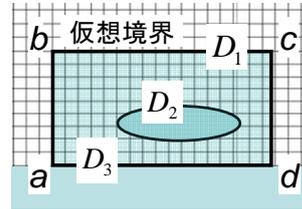


図-2 計算領域（波強制力）

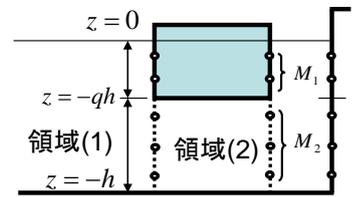


図-3 領域分割（鉛直面）

で、浮体が存在する場合の速度ポテンシャル Φ_1 は、船体がない場合のブシネスクモデルによる波浪場のポテンシャル Φ_0 （入射波ポテンシャル）と、実際には船体が存在することにより生じる Diffraction ポテンシャル Φ_D との和 $\Phi_0 + \Phi_D$ であらわされるとする。まず船体境界上での入射波ポテンシャル Φ_0 を算定するため、図-2に示すように、船舶が係留されている地点を中心に、太い実線で示すような仮想の境界線を設定する。このとき、境界線で囲まれる閉領域にグリーンの定理を用いると、領域内の任意点のポテンシャル値は境界上のポテンシャル値で計算できることから、ブシネスクモデルで得られた境界線上の値を用いることによって、浮体境界位置における入射波ポテンシャル Φ_0 が得られる。次に、このポテンシャル値を外力として Diffraction ポテンシャルに関する境界値問題を定式化し、これを解く事によって Φ_D を求めることができ、波浪強制力が算定できる。

2.1 速度ポテンシャル

波強制力および付加質量力、造波減衰力の算定には領域分割法を用いるため、流体域を浮体の外側の領域(1)と浮体底面下の領域(2)に分割する(図-3参照)。流体運動の速度ポテンシャルは、各領域に関して次のように表わされる。なお、 ζ_0 は基準となる波高(例えば入射波の有義波高など)である。 Φ_1 の右辺第1項が入射波のポテンシャルを意味し、第2項が Diffraction ポテンシャルを意味する。

$$\Phi_1 = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \left\{ f_0(x, y) Z_1^{(0)}(z) + \sum_{n=0}^{\infty} f^{(n)}(x, y) Z_1^{(n)}(z) \right\} \exp(-i\sigma t)$$

$$\Phi_2 = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \left\{ \sum_{s=0}^{\infty} \varphi^{(s)}(x, y) Z_2^{(s)}(z) \right\} \exp(-i\sigma t)$$

$f_0(x, y)$, $f^{(n)}(x, y)$, $\varphi^{(s)}(x, y)$ 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。

2.2 境界条件

各境界における境界条件は次のようになる。

1) 浮体側面および領域(1)と領域(2)の境界面 D_1

$$\phi_1 = \phi_2 \quad (-h \leq z \leq -qh)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial \nu} = \begin{cases} 0 & (-qh \leq z \leq 0) \\ \frac{\partial \phi_2}{\partial \nu} & (-h \leq z \leq -qh) \end{cases}$$

2) 仮想境界 D_2

ブシネスクモデルにより仮想境界 $abcd$ 上では、各格子に対応して水位変動の時系列が得られる。これらの時系列を次のように周波数成分を用いてフーリエ級数表示する。

$$\eta(t) = \sum_{n=0}^{N/2} R_n \left[\zeta^{(n)} \exp(-i\sigma^{(n)}t) \right]$$

速度ポテンシャルと水面変動との関係より、境界線上のポテンシャル値は、水位変動の時系列をフーリエ展開した周波数成分の振幅を用いて次式で与えられる。

$$f_0(x, y) = -i \frac{\zeta(x, y)}{\zeta_0}$$

3) 岸壁境界 D_3

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial \nu} = 0 \quad (\text{岸壁境界 } D_3 \text{ は不透過境界})$$

2.3 遅延関数法による動揺計算

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)を用いる。

$$\sum_{i=1}^6 (m_{ii} + M_{ij}(\infty)) \ddot{x}_i(t) + \sum_{i=1}^6 \left(\int_{-\infty}^t L_{ij}(t-\tau) \dot{x}_i(\tau) d\tau + D_{ij} \dot{x}_i(t) \right) + \sum_{i=1}^6 (C_{ij} + G_{ij}) x_i(t) = F_j(t) \quad (j=1\dots6)$$

$L_{ij}(t)$ は遅延関数と呼ばれ、 $t=0$ での流場の擾乱が t 時間後の波力に及ぼす影響を表す関数である。上式中の右辺 $F_{ij}(t)$ が波強制力を表す。付加質量と造波減衰力はモードごとに Radiation 問題を解いて別途算定しておく、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。

3. 検討方法

ブシネスクモデルによる波浪場解析の結果より、船体境界上の波浪場のポテンシャル(入射波ポテンシャル)を算定するため、船体周りに図-2で示すような船体を囲む閉領域を設定する。この領域の設定は理論上任意の大きさにとることが出来る。数値計算の量を少

なくするには出来るだけ小さい領域を設定するほうが有利だが、ブシネスクモデルで設定した格子サイズは固定であるので、あまり小さくとると数値計算上の精度が悪くなるなどが考えられる。このため図-4中の(a)に示すように、船体を囲む計算領域の大きさを幾通りか変化させた条件について波強制力の計算を行って、解の変動の特性を把握する。

流体力(付加質量力、造波減衰力)の計算においては、岸壁の影響は鏡像を用いて考慮される。この場合も、接岸距離 e (図-4(c))が極端に小さくなると、積分方程式を離散化して解くという数値計算の手法に起因して誤差が大きくなるなどの問題が生じることがあるため、これについて離岸距離を変化させた計算を行って検討する。

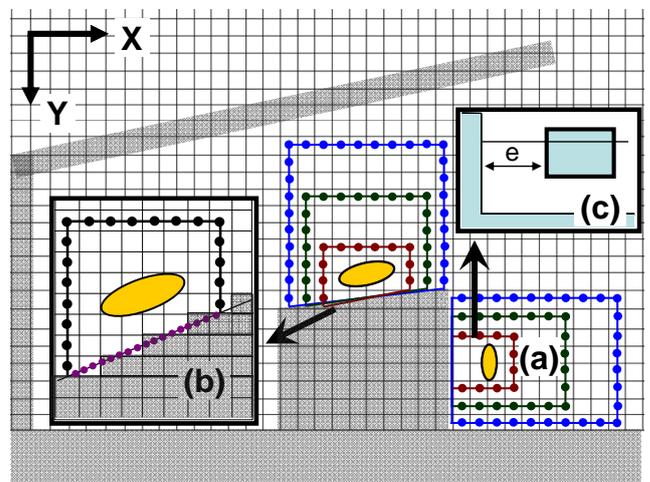


図-4 検討内容の概略図

さらに、接岸岸壁が階段状の格子から構成されるような場合には、計算格子のポテンシャルを用いて直線状に設定した護岸境界上のポテンシャル値をまず算定し、計算格子のポテンシャルと護岸境界上のポテンシャル値を用いて船体境界の入射波ポテンシャルを算定する。この算定の精度に、護岸境界線上の計算要素の大きさと船体の接岸距離が大きく影響することから、これらの関係についても接岸距離を変えた計算を行って検討する。また、計算領域のサイズを変えると岸壁の傾きも若干変わることから、これによる波強制力の変動の程度も検討する。

4. あとがき

ブシネスクモデルの推算結果を用いた波強制力の算定法について、上述した計算諸条件に対する計算精度や解の安定性に関する有益な知見を得た。検討結果については講演時に述べる予定である。

参考文献

1) 吉田明徳・西井康浩・山城賢・加嶋武志・太田一行：ブシネスクモデルの波浪場解析結果を用いた浮体動揺計算における波強制力の算定法，海岸工学論文集，vol.55，pp.801-805 (2008)