

# 潮流と波を受ける海洋構造物の設計用波力荷重による動的応答の評価に関する研究

谷口 朋代<sup>1</sup>・河野健二<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 川崎重工株式会社 装置技術部 (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島 8 番地)

<sup>2</sup>正会員 工博 鹿児島大学工学部海洋土木工学科 教授 (〒890-0065 鹿児島市都元 1-21-40)

潮流と波を同時に受ける海洋構造物の設計に用いる潮流の効果を含む波力荷重の評価方法の開発を行った。まず、変動する波力の最大値の期待値を超過確率に基づく信頼性解析から求め、それらが独自に設定した波力の基準値に補正係数を乗じて波力の特性値として求められるようにした。次に、海洋構造物の不規則応答の最大値の期待値を超過確率に基づく信頼性解析から求め、それらが波力の特性値による静的応答値に補正係数を乗じて求められるようにした。これより、従来、動的解析で評価していた海洋構造物の不規則応答の最大値の期待値が、波力荷重を用いた静的解析で求められるようになった。最後に、波力荷重に用いる補正係数の性質を示し、波力荷重による最大応答値解析の解析精度の検討を行った。

**Key Words:** offshore structure, random vibration, wave-current-structure interaction, design loads, maximum expect value

## 1. はじめに

不規則に変動する波力を受ける海洋構造物の動的応答値は、不規則振動解析によって求めることができ<sup>1)</sup>、使用期間中に発生しうる不規則応答の最大値の期待値や、任意の限界値に対する応答非超過確率を評価しておくことができる<sup>2)</sup>。しかし、構造設計時に動的応答解析を繰返し行うことは多大な労力を要し、他の設計荷重との組合せを考慮することが容易ではないことから効率的な方法ではないことは明らかである。このことは、簡便に海洋構造物の最大応答値を算定して設計を行う手法の開発が必要であることを示唆していると考えた。そこで、著者らは、波による海洋構造物の不規則応答の最大値の期待値を、設計用に考案した波力荷重を用いた静的解析によって評価する方法について研究を行った<sup>3)</sup>。波力荷重は、波力の記述に必要な物理量である波の波高、周期、水粒子の速度、加速度、抗力と慣性力の最大値の期待値を以ってそれぞれの量の特性値とし、それらが独自に設定したそれぞれの量の基準値に補正係数を乗じて求められるようにした。さらに、海洋構造物の不規則応答の最大値の期待値が、波力の特性値を荷重とする海洋構造物の静的応答値に補正係数を乗じることで求められるようにした。波力荷重は他の荷重と組み合わせて静的解析に用いることができる等の利点を有している。

一方、一般に海洋構造物は、波力とともに潮流による力も受ける。著者らは、波力と潮流力を同時に受ける海洋構造物の動的応答解析法の開発及びその応答値の評価に関する研究を行った<sup>4)</sup>。

本研究では、波力荷重の評価方法を<sup>3)</sup>、潮流と波を同時に受ける海洋構造物に拡張して、海洋構造物の構造設計に適した潮流の影響を加味した波力荷重の評価方法について検討を加えた。

## 2. 波力の基準値とその補正方針

本研究では波力がモリソン式で表わされることを前提に検討を進める。モリソン式では、波力は抗力と慣性力の和であり、任意の水深における水粒子速度と加速度に対応した力の和として表される。また、潮流による力は波による抗力と同様に、潮流による水粒子速度に対応した力として表わされる<sup>5)</sup>。本研究では波による力に潮流による力を加えたものを波力の基準値  $F_B(y)$  とし、任意の水深  $y$  における鉛直単円柱に作用する単位長さ当たりの力として次のように定義した。

$$F_B(y) = F_C(y) + F_D(y) + F_I(y) \quad (1)$$

$F_c(y)$ ,  $F_D(y)$ ,  $F_I(y)$  は、潮流による抗力の基準値、潮流の効果を含む波による抗力の基準値、潮流の効果を含む波による慣性力の基準値であり、それぞれ次のように定義する。

$$F_c(y) = \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}_c^2 \quad (2)$$

$$F_D(y) = \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}^2(y) \quad (3)$$

$$F_I(y) = \rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{U}(y) \quad (4)$$

ここで、 $C_d$ ,  $C_m$ ,  $\rho$ ,  $D$ ,  $\dot{U}_c$  はそれぞれ抗力係数、質量係数、海水の密度、円柱の直径と潮流の流速の特性値であり、 $\dot{U}(y)$ ,  $\ddot{U}(y)$  は後述する検討から求められる任意の水深  $y$  における水粒子速度及び加速度の特性値である。

また、潮流の効果を含む波の状態を表わす特性値として、波高  $H$  と周期  $T$  を用いるが、後述する検討を容易にするため、これらの特性値の基準値には、平均波高  $\bar{H}$ 、平均周期  $\bar{T}$  を用いることにした<sup>3)</sup>。

海洋構造物の設計に用いる波力荷重は、波力の基準値に、以下の検討から得られる補正係数を乗じて算定することにした。

- 1) 潮流の効果を含む波高の変動倍率に基づく波高補正係数
- 2) 潮流による抗力、潮流の効果を含む波に基づく抗力と慣性力のそれぞれの変動倍率による波力補正係数
- 3) 海洋構造物の不規則応答特性に関する動的応答倍率による波力補正係数

波高の変動倍率は波高の基準値と波高の最大値の期待値との比であり、波力の変動倍率は波力の各基準値とそれぞれの力の最大値の期待値との比である。また、動的応答倍率は波力の各特性値による構造物の静的応答値とそれぞれの波力による構造物の動的応答値の最大値の期待値との比である。各倍率を求める際に用いた評価時間は<sup>6)</sup>、任意の限界値と応答非超過確率に基づく信頼性解析により求めた。

ただし、それぞれの補正係数に対する潮流の影響が特定できるように、潮流の影響だけを表わす指標を別途定義し、それに潮流が無い場合の波による変動倍率、応答倍率を乗じて、潮流の効果を含む波による変動倍率、応答倍率を与えるようにした。

本研究は、海洋構造物の設計波浪条件が平均波高  $\bar{H}$ 、平均周期  $\bar{T}$  をパラメータとする海面上昇量の変動を表わすパワースペクトル密度関数  $S_{\eta\eta}(\omega)$  で与えられることを前提とし、水粒子の運動が微小振幅波理論及び深海波で表される範囲で行った。また、波のパワースペクトル密度関数には、潮流の有無に関らず一般的

に成立つ波の修正パワースペクトル密度関数  $S_{\eta\eta}^*(\omega)$  を用いることにした<sup>7)</sup>。また、波の修正パワースペクトルに用いる潮流の流速は、水深とは無関係に、時間的変動のない一定値として扱う。

$$S_{\eta\eta}^*(\omega) = C(\omega) S_{\eta\eta}(\omega) \quad (5a)$$

$$C(\omega) = \frac{4}{\left[ 1 + \left( 1 + \frac{4\dot{U}_c\omega}{g} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \left[ \left( 1 + \frac{4\dot{U}_c\omega}{g} \right)^{\frac{1}{2}} + \left( 1 + \frac{4\dot{U}_c\omega}{g} \right) \right]} \quad (5b)$$

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \left( \frac{A}{\omega^5} \right) \exp\left( -\frac{B}{\omega^4} \right) \quad (5c)$$

$$A = 4210 \left( \frac{\bar{H}}{\bar{T}^2} \right)^2, \quad B = \frac{1052}{\bar{T}^4} \quad (5d)$$

ここで、 $C(\omega)$  は、潮流による波の変形効果を表わす関数であり、 $1 + 4\dot{U}_c\omega/g < 0$  となる領域では波が砕けることを表わすカットオフ振動数が存在する。また、波のパワースペクトルは Bretschneider 型とした<sup>8)</sup>。

以後の検討において \* 印を付した量は、波の修正パワースペクトル密度関数に基づいて算出した量であることを示す。ただし、波のパワースペクトル密度関数の空間的広がりとは考慮していない。

### 3. 波高の変動倍率に基づく波高補正係数

微小振幅波理論では、水粒子の速度や加速度が、波高の関数として表わされるので、波高の特性値から、それらの特性値を定めることにした。

波の修正パワースペクトル密度関数から得られる波高の rms 値は次のように表わされる。

$$H_{rms}^2 = \int_0^\infty S_{\eta\eta}^*(\omega) d\omega \quad (6)$$

これより、波高の基準値を用いて、潮流の効果を含む波高の変動倍率  $\nu_1^*$  を、波高補正係数と同次元で次のように定義する。

$$H_{rms}^* = \frac{\nu_1^* \bar{H}}{g_1} \quad (7)$$

ここで、

$$g_1 = \sqrt{2 \ln(n_1 T_1)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(n_1 T_1)}} \quad (8a)$$

$$n_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_0}} \quad (8b)$$

$$\alpha_i = \int_0^\infty \omega^i S_{\eta\eta}^*(\omega) d\omega \quad (i=0, 1, 2) \quad (9)$$

評価時間  $T_1$  は、式(10)に示す初期通過確率に基づいて算定することにした。応答値が任意の限界値  $\gamma$  を超過しない確率  $L_1(\gamma)$  は、初期通過確率により、補正係数  $A_1$  を含んだ形で表される。

$$L_1(\gamma) = \exp\left[-\frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_0}} T_1 \exp\left(\frac{-\gamma^2}{2}\right) A_1\right] \quad (10a)$$

$$A_1 = \frac{1 - \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{2}} q_x \cdot \gamma\right)}{1 - \exp\left(\frac{-\gamma^2}{2}\right)} \quad (10b)$$

$$q_x = \left(1 - \frac{\alpha_1^2}{\alpha_0 \alpha_2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (10c)$$

一方、式(6)と式(9)において、潮流の流速が0の場合には、式(8)と式(10)に従って、波による波高の変動倍率  $v_1$  が定義される<sup>3)</sup>。

$$H_{ms} = \frac{v_1}{g_1} \bar{H} \quad (11)$$

そこで、波による波高の変動倍率  $v_1$  に及ぼす潮流の影響を表わす指標  $\mu_1$  を次のように定義する。

$$\mu_1 = \frac{v_1^*}{v_1} \quad (12)$$

これより、波高の基準値に、波による波高の変動倍率  $v_1$  と波高の変動倍率に及ぼす潮流の影響を表わす指標  $\mu_1$  を乗じて得られる波高の最大値を、潮流の効果を含まず波高の特性値  $H$  として用いることにした。

$$H = \mu_1 v_1 \bar{H} \quad (13)$$

一方、狭帯域の不規則波では、波の周期はあまり広い範囲に分布しないことから、潮流の効果を含まず静的波力の周期の特性値  $T$  には、波高の変動倍率とは無関係に次の関係を用いることにした<sup>3)</sup>。

$$T = T_{\max} \approx T_{1/10} \approx T_{1/3} \approx 1.1\bar{T} \quad (14)$$

波高と周期の特性値  $H, T$  を用いて、任意の水深  $y$  における水粒子速度及び加速度の特性値  $\dot{U}(y), \ddot{U}(y)$  を次のように定義する。

$$\dot{U}(y) = \Omega \frac{\cosh ky}{\sinh kh} \frac{H}{2} \quad (15a)$$

$$\ddot{U}(y) = \Omega^2 \frac{\cosh ky}{\sinh kh} \frac{H}{2} \quad (15b)$$

$$\Omega = \frac{2\pi}{T}, \quad \kappa = \frac{\Omega^2}{g} \quad (15c)$$

ここで、 $g, h$  はそれぞれ重力加速度、対象海域の水深である。

#### 4. 抗力及び慣性力の変動倍率に基づく波力補正係数

モリソン式では、波や潮流による抗力は水粒子の速度の二乗に比例する力として表わされ、慣性力は水粒子の加速度に比例する力として表される。このため時間領域または周波数領域において、これらの力が同時刻または同じ周波数で最大値にはならないと考えられることや、波による応答がほとんど生じない剛な構造物への適用することを考慮して、それぞれの力の変動倍率からそれぞれの力に対する波力補正係数を求めることにした。任意の水深  $y$  における鉛直単円柱に作用する単位長さ当たりの潮流の効果を含む波力のパワースペクトル密度関数  $S_{ff}^*(y, \omega)$  は潮流の効果を含む抗力と慣性力のパワースペクトル密度関数の和として表わされる<sup>4)</sup>。導出の概略を付録に示す。

$$S_{ff}^*(y, \omega) = S_{fd}^*(y, \omega) + S_{fi}^*(y, \omega) \quad (16)$$

$S_{fd}^*(y, \omega)$ : 潮流の効果を含む波による抗力のパワースペクトル密度関数

$S_{fi}^*(y, \omega)$ : 潮流の効果を含む波による慣性力のパワースペクトル密度関数

それぞれの力のパワースペクトル密度関数は波の修正パワースペクトル密度関数を用いて次のように表わされる<sup>4)</sup>。

$$S_{fd}^*(y, \omega) = \left(\frac{1}{2} \rho C_d D \cdot 4 \left\{ \sigma_{mi}^2(y) z(\dot{U}_c) + |\dot{U}_c| \left[ Z(\dot{U}_c) \right] \right\}^2 S_{mi}^*(y, \omega) \right) \quad (17)$$

$$S_{fi}^*(y, \omega) = \left[ \rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \right]^2 S_{mi}^*(y, \omega) \quad (18)$$

$$\sigma_{mi}^2(y) = \int_0^\infty S_{mi}^*(y, \omega) d\omega \quad (19)$$

$$z(\dot{U}_c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{mi}^*(y)} \exp\left[\frac{-\dot{U}_c^2}{2\sigma_{mi}^2(y)}\right] \quad (20a)$$

$$Z(\dot{U}_c) = \int_0^{\dot{U}_c} z(t) dt \quad (20b)$$

水粒子の速度のパワースペクトル密度関数

$$S_{\dot{u}}^*(y, \omega) = \omega^2 \frac{\cosh^2 \kappa y}{\sinh^2 \kappa h} S_{\eta\eta}^*(\omega) \quad (21)$$

水粒子の加速度のパワースペクトル密度関数

$$S_{\ddot{u}}^*(y, \omega) = \omega^4 \frac{\cosh^2 \kappa y}{\sinh^2 \kappa h} S_{\eta\eta}^*(\omega) \quad (22)$$

### (1) 潮流による抗力の変動倍率に基づく波力補正係数

本研究では、潮流の流速には、水深や時間的変動とは無関係な一定値を用いるので、潮流による抗力は全水深に亘って一定な値となる。このことから、波力補正係数と同次元である潮流による抗力の変動倍率  $v_{2c}$  と、潮流による抗力に及ぼす潮流の影響を示す指標  $\mu_{2c}$  は、1.0 に等しいものとする。

これより、潮流による抗力の基準値に潮流による抗力の変動倍率  $v_{2c}$  と潮流による抗力に及ぼす潮流の影響を表わす指標  $\mu_{2c}$  を乗じて得られる抗力の最大値  $F_c'(y)$  を、潮流による静的抗力の特性値として用いることにする。

$$F_c'(y) = \mu_{2c} v_{2c} \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}_c^2 \quad (23)$$

$$v_{2c} = 1.0, \quad \mu_{2c} = 1.0 \quad (24)$$

ここで、海底付近での潮流の流速は0であるが、その範囲は小さく構造物に及ぼす影響はほとんどないと考えられることから、構造設計時にはこれを無視し全水深に亘って一律な抗力を作用させることにした。

### (2) 波による抗力の変動倍率に基づく波力補正係数

潮流の効果を含む波による抗力のパワースペクトル密度関数より、任意の水深  $y$  における抗力の rms 値は次式で与えられる。

$$F_{D_{rms}}^*(y) = \int_0^\infty S_{\dot{u}}^*(y, \omega) d\omega \quad (25)$$

これより、潮流の効果を含む波による抗力の基準値を用いて、潮流の効果を含む波による抗力の変動倍率  $v_2^*$  を、波力補正係数と同次元で次のように定義する。

$$F_{D_{rms}}^*(y) = \frac{v_2^*}{g_2} F_D(y) \quad (26)$$

式(3)と式(17)より、式(26)は水粒子の速度の比較として表わすことができる。

$$4\sigma_{\dot{u}}^*(y) \left\{ \sigma_{\dot{u}}^*(y) z(\dot{U}_c) + |\dot{U}_c| z(\dot{U}_c) \right\} = \frac{v_2^*}{g_2} \dot{U}^2(y) \quad (27)$$

$$g_2 = \sqrt{2 \ln(n_2 T_2)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(n_2 T_2)}} \quad (28a)$$

$$n_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_0}} \quad (28b)$$

$$\alpha_i = \int_0^\infty \omega^i S_{\dot{u}}^*(y, \omega) d\omega \quad (i=0, 1, 2) \quad (29)$$

評価時間  $T_2$  は、式(10)に示す任意の限界値  $\gamma$  に対する初期通過確率に基づいて求めた。

一方、式(27)と式(29)において、潮流の流速が0の場合には、式(10)と式(28)に従って、波による抗力の変動倍率  $v_2$  が定義される<sup>3)</sup>。

$$\sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_{\dot{u}}^*(y) = \frac{v_2}{g_2} \dot{U}^2(y) \quad (30)$$

そこで、波による抗力の変動倍率  $v_2$  に及ぼす潮流の影響を表わす指標  $\mu_2$  を次のように定義する。

$$\mu_2 = \frac{v_2^*}{v_2} \quad (31)$$

これより、潮流の効果を含む波による抗力の基準値に、波による抗力の変動倍率  $v_2$  と波による抗力に及ぼす潮流の効果を表わす指標  $\mu_2$  を乗じて得られる抗力の最大値  $F_b'(y)$  を、潮流の効果を含む波による抗力の特性値として用いることにした。

$$F_b'(y) = \mu_2 v_2 \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}^2(y) \quad (32)$$

### (3) 波による慣性力の変動倍率に基づく波力補正係数

潮流の効果を含む波による慣性力のパワースペクトル密度関数より、任意の水深  $y$  における慣性力の rms 値は次式で与えられる。

$$F_{I_{rms}}^*(y) = \int_0^\infty S_{\ddot{u}}^*(y, \omega) d\omega \quad (33)$$

これより、潮流の効果を含む波による慣性力の基準値を用いて、潮流の効果を含む波による慣性力の変動倍率  $v_3^*$  を、波力補正係数と同次元で次のように定義する。

$$F_{I_{rms}}^*(y) = \frac{v_3^*}{g_3} F_I(y) \quad (34)$$

式(4)と式(18)より、式(34)は水粒子の加速度の比較として表わすことができる。

$$\sigma_{\dot{u}}^*(y) = \frac{v_3^*}{g_3} \ddot{U}(y) \quad (35)$$

$$g_3 = \sqrt{2 \ln(n_3 T_3)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(n_3 T_3)}} \quad (36a)$$

$$n_3 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_0}} \quad (36b)$$

$$\alpha_i = \int_0^\infty \omega^i S_{\dot{r}}^*(y, \omega) d\omega \quad (i=0, 1, 2) \quad (37)$$

$$\sigma_{\dot{u}}^{*2}(y) = \int_0^\infty S_{\dot{u}}^*(y, \omega) d\omega \quad (38)$$

評価時間  $T_3$  は、式(10)に示す任意の限界値  $\gamma$  に対する初期通過確率に基づいて求めた。

一方、式(35)と式(37)、(38)において潮流の流速が0の場合には、式(10)と式(36)に示す手順に従って、波による慣性力の変動倍率  $v_3$  が定義される<sup>3)</sup>。

$$\sigma_{\dot{u}}(y) = \frac{v_3}{g_3} \ddot{U}(y) \quad (39)$$

そこで、波による慣性力の変動倍率  $v_3$  に及ぼす潮流の影響を表わす指標  $\mu_3$  を、次のように定義する。

$$\mu_3 = \frac{v_3^*}{v_3} \quad (40)$$

これより、潮流の効果を含む波による慣性力の基準値に、波による慣性力の変動倍率  $v_3$  と、波による慣性力に及ぼす潮流の効果を表わす指標  $\mu_3$  を乗じて得られる慣性力の最大値  $F_I(y)$  を、潮流の効果を含む波による慣性力の特性値として用いることにした。

$$F_I(y) = \mu_3 v_3 \rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{U}(y) \quad (41)$$

## 5. 不規則応答特性に基づく波力補正係数

これまでに検討した波力補正係数には、構造物の応答の影響が全く含まれていない。一般に、海洋構造物は可撓性を有するので、構造設計時には構造物の不規則応答特性を反映する必要がある。そこで、構造物の動的特性を波力補正係数に反映させる方法について検討を行う。著者らは、次に示す等価線形化された運動方程式に基づいて、潮流と波を同時に受ける海洋構造物の不規則振動解析を行うことを提案した<sup>4)</sup>。導出

の概略を付録に示す。

$$\begin{aligned} & \left( m + \rho(C_m - 1) \frac{\pi}{4} D^2 \right) \ddot{x} + \\ & \left( c + \frac{1}{2} \rho C_d D \cdot 4 \left\{ \sigma_r^2 z(\dot{U}_c) + |\dot{U}_c| z(\dot{U}_c) \right\} \right) \dot{x} + kx \\ & = \frac{1}{2} \rho C_d D \cdot 4 \left\{ \sigma_r^2 z(\dot{U}_c) + |\dot{U}_c| z(\dot{U}_c) \right\} \dot{u}^* + \rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{u}^* \end{aligned} \quad (42)$$

ここで、 $r = \dot{u} - \dot{x}$ 、 $\sigma_r^2 = \sigma_u^2 + \sigma_x^2$  であり、 $\dot{u}^*$ 、 $\ddot{u}^*$  はそれぞれ潮流の効果を含む波による水粒子の速度、加速度である。 $m$ 、 $c$ 、 $k$  はそれぞれ構造物の質量、減衰、剛性である。また、著者らは、時間的に無変動な潮流による力に関する項は、最適化手法を用いて式(42)を導く際に除外されるので、潮流と波を受ける海洋構造物の全応答値を求めるためには、式(42)から求められる動的応答値に、次式から求められる静的応答値を加える必要があることを示した<sup>4)</sup>。

$$kx_s = \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}_c |\dot{U}_c| \quad (43)$$

ここで、 $x_s$  は静的応答値である。

一方、海洋構造物は、構造物と水粒子の相対速度に応じた流体力を受けるので、潮流による抗力、潮流の効果を含む波による抗力及び慣性力のそれぞれ力に対する波力補正係数だけでは、動的応答時に作用する非線形流体力の影響までを表現できないことは明らかである。そこで、これまでの検討との整合性を考え、次に示す4つの検討に基づいて、不規則応答特性を反映した波力補正係数を定義することにした。

- 1) 潮流による抗力が卓越する場合
- 2) 潮流の効果を含む波による抗力が卓越する場合
- 3) 潮流の効果を含む波による慣性力が卓越する場合
- 4) 潮流の効果を含む波による抗力と慣性力の2つの力が同時に作用した場合

2) 及び 3) は、潮流の効果を含む波による抗力と慣性力が時間領域または周波数領域において、同時刻または同じ周波数で最大値にはならないことに対処する波力補正係数であり、4) は、動的応答時に作用する水粒子速度と構造物の速度の相対差の分散に起因する流体力の非線形性に対処する波力補正係数である。これらの波力補正係数は、構造物の不規則応答特性に関する動的応答倍率から求めることができる。

### (1) 潮流による抗力が卓越する場合

潮流による抗力が卓越する場合の構造物の応答は式(43)に基づいて静的解析で求められることから、潮流による抗力が卓越する場合の構造物の応答特性に関

する応答倍率  $v_{4c}$  は、潮流の方向による構造物の応答方向を表わす指標としての純静的な取扱いを行う。

これより、潮流による静的抗力の特性値  $F'_c(y)$  を用いて、応答倍率  $v_{4c}$  を波力補正係数と同次元で次のように定義する。

$$M(\bar{F}_c(y))_{static} = v_{4c} M(F'_c(y))_{static} \quad (44)$$

$$\bar{F}_c(y) = \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}_c |\dot{U}_c| \quad (45)$$

$M(\bar{F}_c(y))_{static}$  : 式(45)で表わされる潮流による抗力による構造物の静的モーメント値

$M(F'_c(y))_{static}$  : 式(23)で表わされる潮流による静的抗力の特性値による構造物の静的モーメント値

式(44)に式(23)と式(45)を代入して、応答倍率  $v_{4c}$  と潮流の流速の関係が次のように求められる。

$$v_{4c} = \frac{\dot{U}_c |\dot{U}_c|}{\mu_{2c} v_{2c} \dot{U}_c^2} = \frac{sign(\dot{U}_c)}{\mu_{2c} v_{2c}} \quad (46)$$

ここで、 $sign(\dot{U}_c)$  は  $\dot{U}_c$  の符号を表わす関数である。

また、構造物の応答に及ぼす潮流の影響を表わす指標  $\mu_{4c}$  は、1.0 に等しいものとする。

これより、潮流による静的抗力の特性値に、応答倍率  $v_{4c}$  と応答に及ぼす潮流の効果を表わす指標  $\mu_{4c}$  を乗じて補正した静的抗力  $F''_c(y)$  を荷重とする静的解析によって、潮流による抗力が卓越する場合の構造物の応答の最大値を得ることができる。

$$F''_c(y) = \mu_{4c} v_{4c} \mu_{2c} v_{2c} \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}_c^2 \quad (47)$$

## (2) 波による抗力が卓越する場合

潮流の効果を含む波による静的抗力の特性値  $F'_D(y)$  を用いて、潮流の効果を含む波による抗力が卓越する場合の構造物の不規則応答特性に関する動的応答倍率  $v_4$  を、波力補正係数と同次元で次のように定義する。

$$M(S_{fd}^*(y, \omega))_{rms} = \frac{v_4}{g_4} M(F'_D(y))_{static} \quad (48)$$

$M(S_{fd}^*(y, \omega))_{rms}$  : 潮流の効果を含む波による抗力の

パワースペクトル密度関数による構造物の rms モーメント値

$M(F'_D(y))_{static}$  : 式(32) 静的抗力の特性値による構

造物の静的モーメント値

ここで、

$$g_4 = \sqrt{2 \ln(n_4 T_4)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(n_4 T_4)}} \quad (49a)$$

$$n_4 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_0}} \quad (49b)$$

$$\alpha_i = \int_0^\infty \omega^i M(S_{fd}^*(y, \omega)) d\omega \quad (i = 0, 1, 2) \quad (50)$$

評価時間  $T_4$  は、式(10)に示す任意の限界値  $\gamma$  に対する初期通過確率に基づいて求めた。

ここで、荷重評価は構造物に発生する最大曲げモーメント値を用いて行うことにした<sup>3)</sup>。

一方、式(48)と式(50)において、潮流の流速が0の場合には、式(10)と式(49)に従って、波による抗力が卓越する場合の構造物の不規則応答特性に関する動的応答倍率  $v_4$  が定義される<sup>3)</sup>。

$$M(S_{fd}^*(y, \omega))_{rms} = \frac{v_4}{g_4} M(F'_D(y))_{static} \quad (51)$$

そこで、波による抗力による動的応答倍率  $v_4$  に及ぼす潮流の影響を表わす指標  $\mu_4$  を次のように定義する。

$$\mu_4 = \frac{v_4}{v_4} \quad (52)$$

これより、潮流の効果を含む波による静的抗力の特性値に、波による構造物の動的応答倍率  $v_4$  と動的応答倍率に及ぼす潮流の影響を表わす指標  $\mu_4$  を乗じて補正した静的抗力  $F''_D(y)$  を荷重とする静的解析によって、潮流の効果を含む波による抗力が卓越する場合の構造物の不規則応答の最大値の期待値を得ることができる。

$$F''_D(y) = \mu_4 v_4 \mu_2 v_2 \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}^2(y) \quad (53)$$

## (3) 波による慣性力が卓越する場合

潮流の効果を含む波による静的慣性力の特性値  $F'_I(y)$  を用いて、潮流の効果を含む波による慣性力が卓越する場合の構造物の不規則応答特性に関する動的応答倍率  $v_5$  を、波力補正係数と同次元で次のように定義する。

$$M(S_{fi}^*(y, \omega))_{rms} = \frac{v_5}{g_5} M(F'_I(y))_{static} \quad (54)$$

$M(S_{fi}^*(y, \omega))_{rms}$  : 潮流の効果を含む波による慣性力

のパワースペクトル密度関数による  
構造物の rms モーメント値  
:式(41)で表される静的慣性力の特  
性値による構造物の静的モーメン  
ト値

$$M(F_i(y))_{static}$$

ここで、

$$g_5 = \sqrt{2 \ln(n_5 T_5)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(n_5 T_5)}} \quad (55a)$$

$$n_5 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_0}} \quad (55b)$$

$$\alpha_i = \int_0^\infty \omega' M(S_{\beta'}^*(y, \omega)) d\omega \quad (i=0, 1, 2) \quad (56)$$

評価時間  $T_5$  は、式(10)に示す任意の限界値  $\gamma$  に対する初期通過確率に基づいて求めた。

一方、式(54)と式(56)において、潮流の流速が0の場合には、式(10)と式(55)に従って、波による慣性力が卓越する場合の構造物の不規則応答特性に関する動的応答倍率  $\nu_5$  が定義される<sup>3)</sup>。

$$M(S_{\beta'}(y, \omega))_{rms} = \frac{\nu_5}{g_5} M(F_i(y))_{static} \quad (57)$$

そこで、波による慣性力による動的応答倍率  $\nu_5$  に及ぼす潮流の影響を表わす指標  $\mu_5$  を、次のように定義する。

$$\mu_5 = \frac{\nu_5^*}{\nu_5} \quad (58)$$

これより、潮流の効果を含む波による静的慣性力の特性値に、波による構造物の動的応答倍率  $\nu_5$  と動的応答倍率に及ぼす潮流の影響を表わす指標  $\mu_5$  を乗じて補正した静的慣性力  $F_i''(y)$  を荷重とする静的解析によって、潮流の効果を含む波による慣性力が卓越する場合の構造物の不規則応答の最大値の期待値を得ることができる。

$$F_i''(y) = \mu_5 \nu_5 \mu_3 \nu_3 \rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{U}(y) \quad (59)$$

#### (4) 2つの力が同時に作用する場合

潮流の効果を含む波による抗力と慣性力の2つの力が同時に作用する場合の構造物の不規則応答特性に関する動的応答倍率  $\nu_6^*$  を波力補正係数と同次元で次のように定義する。

$$M(S_{\beta'}^*(y, \omega))_{rms} = \frac{\nu_6^*}{g_6} M(F_B''(y))_{static} \quad (60)$$

$M(S_{\beta'}^*(y, \omega))_{rms}$  :潮流の効果を含む波力のパワースペクトル密度関数による構造物の rms モーメント値

$M(F_B''(y))_{static}$  :潮流の効果を含む波による抗力と慣性力のそれぞれが作用する場合の構造物の不規則応答曲げモーメントの最大値の和

ここで、

$$g_6 = \sqrt{2 \ln(n_6 T_6)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(n_6 T_6)}} \quad (61a)$$

$$n_6 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_0}} \quad (61b)$$

$$\alpha_i = \int_0^\infty \omega' M(S_{\beta'}^*(y, \omega)) d\omega \quad (i=0, 1, 2) \quad (62)$$

評価時間  $T_6$  は、式(10)に示す任意の限界値  $\gamma$  に対する初期通過確率に基づいて求めた。

ここで、 $M(F_B''(y))_{static}$  は、応答倍率と潮流の効果を表わす指標を乗じて補正された静的抗力  $F_B''(y)$  と静的慣性力  $F_I''(y)$  の和を荷重とする静的解析で得られる曲げモーメント値に等しいことから、 $F_B''(y)$  を次のように表すことができる。

$$F_B''(y) = \mu_4 \nu_4 \mu_2 \nu_2 \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}^2(y) + \mu_5 \nu_5 \mu_3 \nu_3 \rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{U}(y) \quad (63)$$

一方、式(60)と式(62)において、潮流の流速が0の場合には、式(10)と式(61)に従って、波による抗力と慣性力の2つの力が同時に作用する場合の構造物の不規則応答特性に関する動的応答倍率  $\nu_6$  が定義される<sup>3)</sup>。

$$M(S_{\beta'}(y, \omega))_{rms} = \frac{\nu_6}{g_6} M(F_B''(y))_{static} \quad (64)$$

そこで、波による抗力と慣性力の2つの力による動的応答倍率  $\nu_6$  に及ぼす潮流の影響を表わす指標  $\mu_6$  を次のように定義する。

$$\mu_6 = \frac{\nu_6^*}{\nu_6} \quad (65)$$

これより、式(63)で表わされる補正された静的抗力と静的慣性力の和に、波による動的応答倍率  $\nu_6$  と動的

応答倍率に及ぼす潮流の影響を表わす指標  $\mu_6$  を乗じて補正した静的波力  $F_B'''(y)$  を荷重とする静的解析によって、潮流の効果を含む波力による不規則応答の最大値の期待値を得ることができる。

$$F_B'''(y) = \mu_6 v_6 \left\{ \mu_4 v_4 \mu_2 v_2 \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}^2(y) + \mu_5 v_5 \mu_3 v_3 \rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{U}(y) \right\} \quad (66)$$

これまでの検討により、潮流と波力を同時に受ける海洋構造物の全応答値の最大値の期待値は、式(47)と式(66)の和として表わされる海洋構造物設計用波力荷重  $F(y)_{Design}$  を用いた静的解析によって得ることができる。

$$F(y)_{Design} = \mu_{4c} v_{4c} \mu_{2c} v_{2c} \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}_c^2 + \mu_6 v_6 \left\{ \mu_4 v_4 \mu_2 v_2 \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}^2(y) + \mu_5 v_5 \mu_3 v_3 \rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{U}(y) \right\} \quad (67)$$

## 6. 補正係数の特徴

波高、抗力、慣性力の変動倍率や応答倍率  $v_1 \sim v_6$  とそれぞれの変動倍率や応答倍率に及ぼす潮流の影響を表わす指標  $\mu_1 \sim \mu_6$  と、波浪条件や潮流の流速との関係について検討した。検討は、波浪条件として平均波高  $\bar{H}$  を 3m, 5m, 7m, 平均周期  $\bar{T}$  を 5, 6, ..., 15 秒とし、潮流の流速  $\dot{U}_c$  を -2, -1, ..., 2m/s とした。

ここで、各倍率の算定に用いた評価時間は、式(7)において変動成分の標準偏差 (rms 値) の3倍の限界値 ( $\gamma = 3$ ) に対する応答非超過確率が 3% となる値とした。評価時間の値は、全解析ケースにおいて一般的な台風の暴風継続時間 (3~5 時間) より小さな値 (1000~2000sec 前後) となり、本研究で示す波力が実際に再現される継続時間内にあることを表している。

### (1) 波高の変動倍率

著者らは、波による波高の変動倍率  $v_1$  について検討を行い、 $v_1$  は、波浪条件の組合わせに関らず、ほぼ一定値となることを示した<sup>3)</sup>。これは、波浪条件に関わらず、波高の最大値の期待値が、波高の基準値に対してほぼ一定の倍率になるからである。波浪条件と  $v_1$  との関係を図-1に示す。一方、波高の変動倍率に及ぼす潮流の影響を表わす指標  $\mu_1$  と波浪条件との関係を図-2に示す。 $\mu_1$  は、平均波高とは無関係に潮流の流速毎

に平均周期に対して分布する。潮流の流速が負値の場合、波の形状が鋭くなるので  $\mu_1$  は 1.0 より大きい値となり、カットオフ振動数の影響により、流速-2m/s、平均周期 6 秒付近でピークを示すと考えられる。一方、潮流の流速が正值の場合、波の形状が緩やかになるので  $\mu_1$  が 1.0 より小さい値になる。

### (2) 抗力の変動倍率

著者らは、波による抗力の変動倍率  $v_2$  について検討を行い、深海波の仮定が成立つ範囲では、 $v_2$  は平均波高とは無関係に、平均周期に対してのみ分布することを示した<sup>3)</sup>。これは、水粒子速度の最大値の期待値が、水粒子速度の基準値に対して平均波高とはほぼ無関係に平均周期に依存することに基づくものである。本研究の全検討条件に対して深海波の仮定を適用できる水深 200m の海域の海面位置での波浪条件と  $v_2$  との関係を図-3に示す。

一方、抗力の変動倍率に及ぼす潮流の影響を表わす指標  $\mu_2$  と波浪条件との関係を図-4、図-5に示す。各図の凡例は、潮流の流速  $\dot{U}_c$  と平均波高  $\bar{H}$  の組合せ  $(\dot{U}_c, \bar{H})$  を示している。図-4は、潮流の流速が正值の場合を示しており、図-5は、潮流の流速が負値の場合を示している。 $\mu_2$  は、潮流の流速と平均波高の組合せ毎に平均周期に対して分布するが、図-4と図-5の比較から、潮流の流速が正值の場合と負値の場合とは、その分布の傾向が大きく異なることが分かる。

分布の傾向が大きく異なることは、波の修正パワースペクトル密度関数が示す性質に依存していると考えられる。一般に、潮流の流速が正值の場合には、波の形状が緩やかになり、波による水粒子の速度が遅くなるため、波の抗力は小さくなる。この傾向は、図-4において、潮流の流速が 1m/s の場合の  $\mu_2$  の値が概ね 1.0 以下であることに現れている。しかし、流速が 2m/s の場合に、 $\mu_2$  の値が 1.0 以下とならない理由は、等価線形化された抗力が、潮流の効果を含む波による水粒子速度に関する項と、潮流の流速の強度に関する項の和で表わされており、潮流の流速が及ぼす効果が大きくなるからであると考えられる。

一方、潮流の流速が負値の場合には、波の形状が鋭くなり、波による水粒子の速度が速くなるため、波による抗力は大きくなる。この傾向は、図-5において、潮流の流速が -1m/s の場合の  $\mu_2$  の値が 1.0 以上であることに現れている。しかし、流速が -2m/s の場合に、 $\mu_2$  の値が必ずしも 1.0 以上とならない理由は、流速が正值の場合と同様に、潮流の流速が及ぼす効果が大きくなるとともに、カットオフ振動数の影響が大きいためと考えられる。



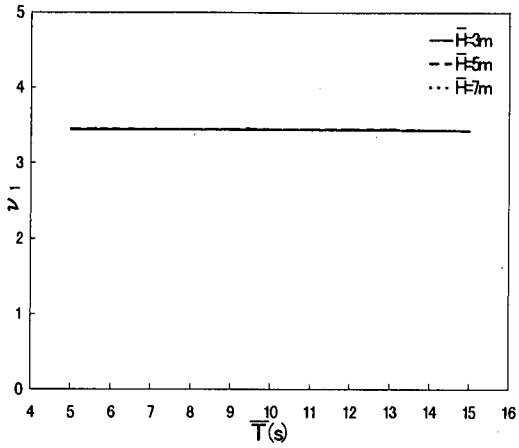


図-1 波による波高の変動倍率

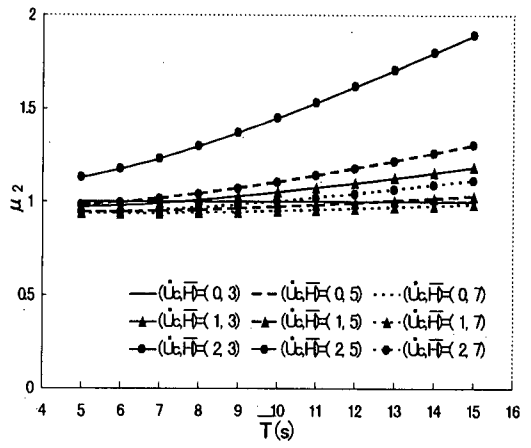


図-4 抗力の変動倍率に及ぼす潮流の影響  
(潮流の流速が正值の場合)

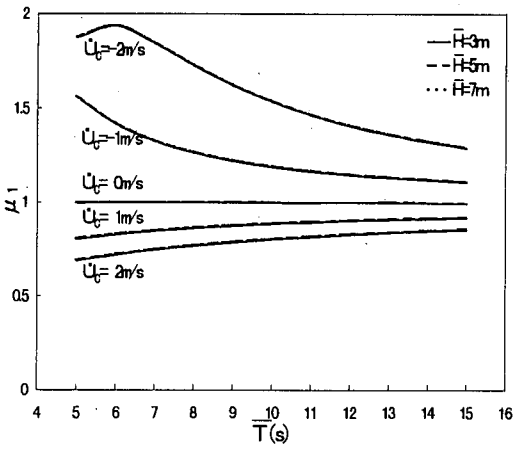


図-2 波高の変動倍率に及ぼす潮流の影響

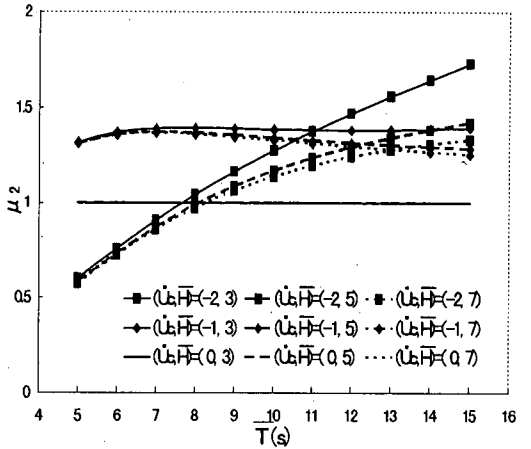


図-5 抗力の変動倍率に及ぼす潮流の影響  
(潮流の流速が負値の場合)

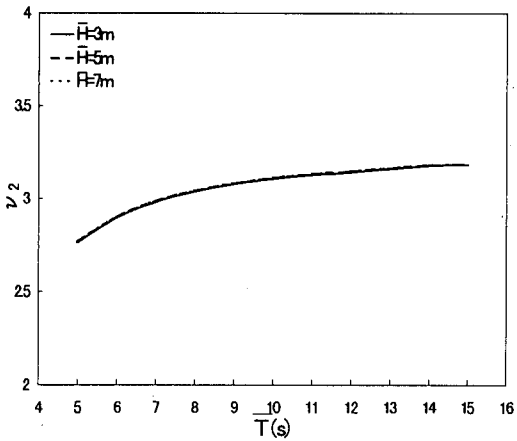


図-3 波による抗力の変動倍率

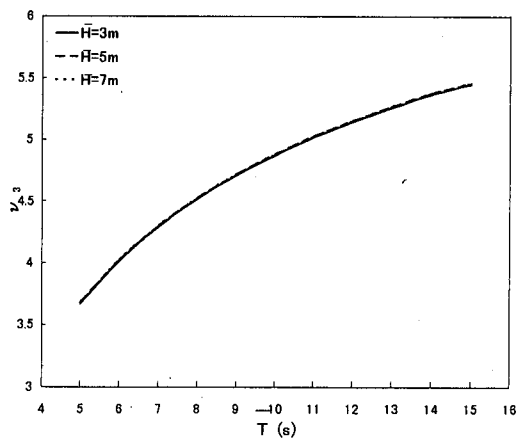


図-6 波による慣性力の変動倍率

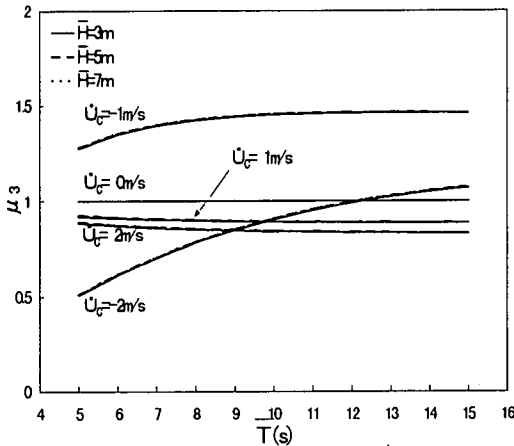


図-7 慣性力の変動倍率に及ぼす潮流の影響

### (3) 慣性力の変動倍率

著者らは、波による慣性力の変動倍率 $\nu_3$ について検討を行い、深海波の仮定が成立する範囲では、 $\nu_3$ は平均波高とは無関係に、平均周期に対してのみ分布することを示した<sup>3)</sup>。これは、水粒子加速度の最大値の期待値が、水粒子加速度の基準値に対して平均周期に依存することに基づくものである。本研究の全検討条件に対して深海波の仮定を適用できる水深200mの海域の海面位置での波浪条件と $\nu_3$ との関係を図-6に示す。

一方、慣性力の変動倍率に及ぼす潮流の影響を表わす指標 $\mu_3$ と波浪条件との関係を図-7に示す。 $\mu_3$ は、平均波高とは無関係に潮流の流速毎に平均周期に対して分布する。また、潮流の流速が正值の場合と負値の場合とで、分布の傾向が大きく異なることは、抗力と同様に波の修正パワースペクトルが示す性質に依存していると考えられる。潮流の流速が正值の場合、波の形状が緩やかになり、波による水粒子の加速度が遅くなるため、波の慣性力は小さくなり、その効果は流速の強度に比例することが図-7より分かる。一方、潮流の流速が負値の場合、波の形状が鋭くなり、波による水粒子の加速度が速くなるため、波による抗力は大きくなるが、カットオフ振動数の影響により、その効果は流速の強度には比例しないことが図-7より分かる。

### (4) 抗力が卓越する場合の応答倍率

著者らは、波による抗力が卓越する場合の応答倍率 $\nu_4$ について検討を行い、 $\nu_4$ に対して平均波高の影響はほとんど無く、部材径の違いによる影響も少ないが、固有周期が近接していても構造物毎に値が異なることを示した<sup>3)</sup>。図-8に示す鋼製海洋構造物の解析モデルを用いて、 $\nu_3$ と波浪条件との関係を検討した結果を

図-14に示す。図の凡例は、柱径 $D$ と平均波高 $\bar{H}$ の組合せ $(D, \bar{H})$ を示している。図-14より、文献3)で

影響を検討することにした。解析モデルの柱、梁、斜材の部材径は、それぞれ2m、1m、1mであり、板厚は全部材とも25mmである。また、構造減衰を3%とし、頂部デッキ質量として2000tを見込んだ。比較のため、柱径だけを3mに変更した場合の検討も行った。検討結果は、構造物の固有振動数 $\omega_n$ と波浪のエネルギーが集中する周波数 $\omega_p$ との比として振動数比 $\beta$ を定義し<sup>3)</sup>、 $\beta$ に基づいて整理した。

$$\beta = \frac{\omega_n}{\omega_p}, \quad \omega_p = \frac{5.386}{T} \quad (68)$$

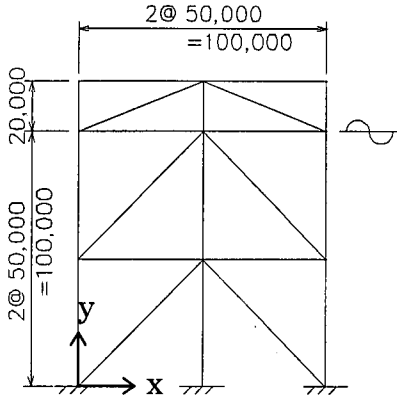
柱径毎の解析モデルの固有周期をモデル図の下に示す。また、検討は、水深100mの場合に深海波の仮定が成立する範囲となる平均周期 $\bar{T}$ が5, 6, ..., 10秒の条件で行い<sup>3)</sup>、構造物の応答は5次モードまで考慮した。波による抗力が卓越する場合の応答倍率 $\nu_4$ と波浪条件との関係を図-9に示す。図の凡例は、柱径 $D$ と平均波高 $\bar{H}$ の組合せ $(D, \bar{H})$ を示している。図-9より、文献3)での結果と同様、 $\nu_4$ に対して、平均波高の影響はほとんど無く、部材径の違いによる影響も少ないことが分かる。

一方、抗力による動的応答倍率に及ぼす潮流の影響を表わす指標 $\mu_4$ と波浪条件との関係を図-10～図-13に示す。図-10と図-11は、柱径が2mで潮流の流速が正值の場合と負値の場合を示しており、図-12と図-13は、同じく柱径が3mの場合を示している。各図の凡例は、潮流の流速 $\dot{U}_c$ と平均波高 $\bar{H}$ の組合せ $(\dot{U}_c, \bar{H})$ を示している。

図-10と図-11、あるいは図-12と図-13との比較から、潮流の流速が正值の場合と負値の場合とでは、 $\mu_4$ の分布の様子が大きく異なることが分かる。これは、(2)節で示した波の修正パワースペクトルが示す性質に依存していると考えられる。一方、図-10と図-12、あるいは図-11と図-13との比較から、柱径が異なれば、 $\mu_4$ の傾向が大きく異なることが分かる。このことから、潮流を受ける海洋構造物の場合には、柱径の変化が応答に及ぼす影響が大きいことが分かる。

### (5) 慣性力が卓越する場合の応答倍率

著者らは、波による慣性力が卓越する場合の応答倍率 $\nu_3$ について検討を行い、 $\nu_3$ に対して平均波高の影響はほとんど無く、部材径の違いによる影響も少ないが、固有周期が近接していても構造物毎に値が異なることを示した<sup>3)</sup>。図-8に示す鋼製海洋構造物の解析モデルを用いて、 $\nu_3$ と波浪条件との関係を検討した結果を



$\phi$  2000 の時,  $\omega_1=6.395$  rad/s, ( $T_1=0.983$  s)

$\phi$  3000 の時,  $\omega_1=6.079$  rad/s, ( $T_1=1.034$  s)

図-8 解析モデル図 (寸法の単位: mm)

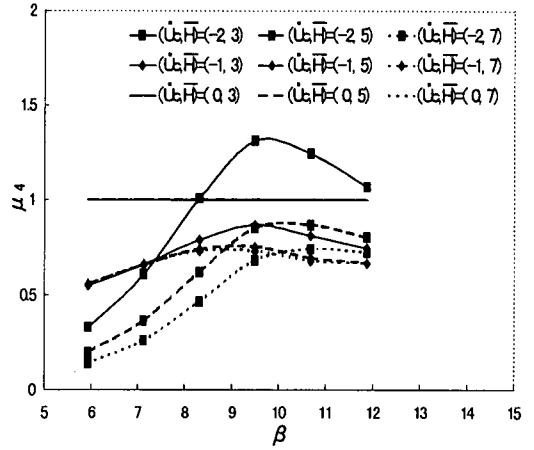


図-11 抗力の動的応答倍率に及ぼす潮流の影響  
(柱径 2m, 潮流の流速が負値の場合)

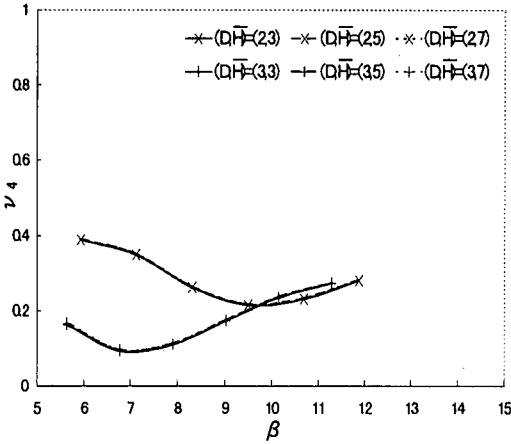


図-9 波による抗力が卓越する場合の応答倍率

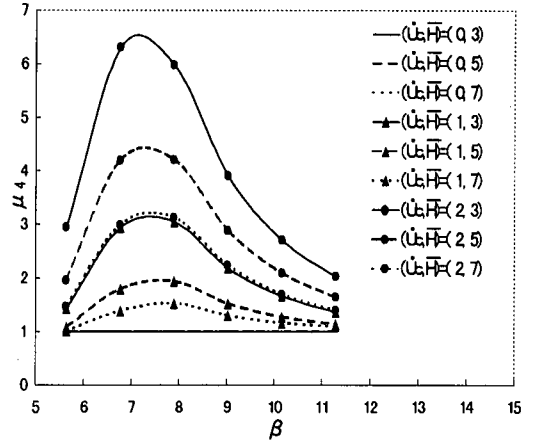


図-12 抗力の動的応答倍率に及ぼす潮流の影響  
(柱径 3m, 潮流の流速が正值の場合)

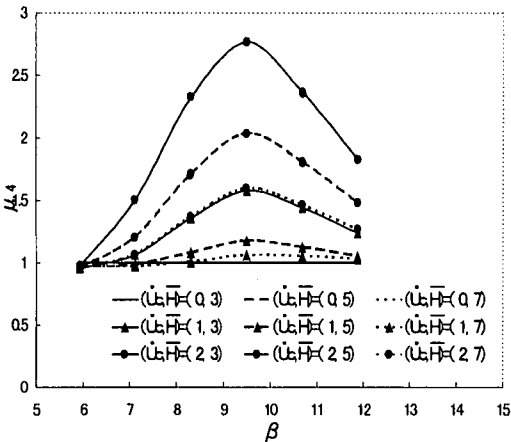


図-10 抗力の動的応答倍率に及ぼす潮流の影響  
(柱径 2m, 潮流の流速が正值の場合)

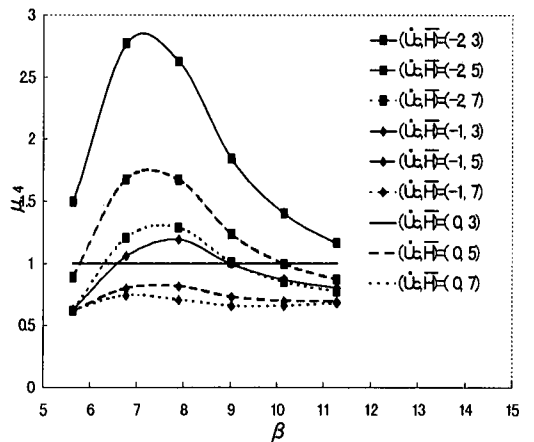


図-13 抗力の動的応答倍率に及ぼす潮流の影響  
(柱径 3m, 潮流の流速が負値の場合)

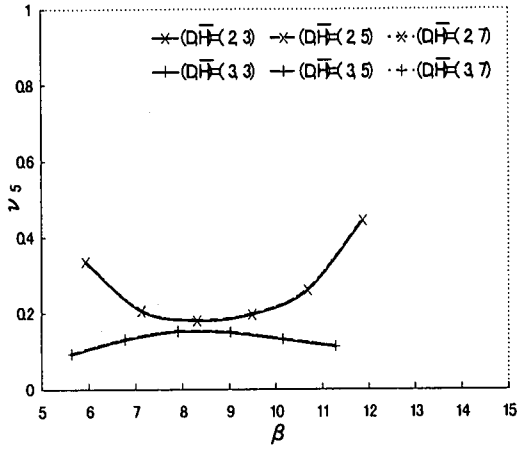


図-14 波による慣性力が卓越する場合の応答倍率

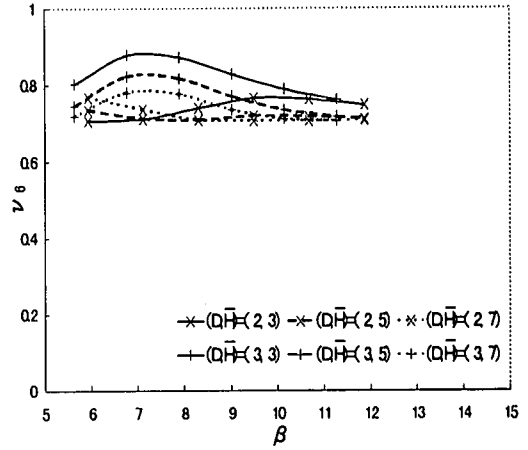


図-17 2つの力が同時に作用する場合の応答倍率

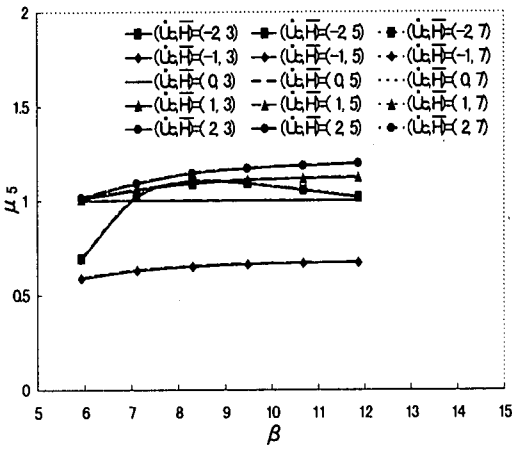


図-15 慣性力の動的応答倍率に及ぼす潮流の影響(柱径2m)

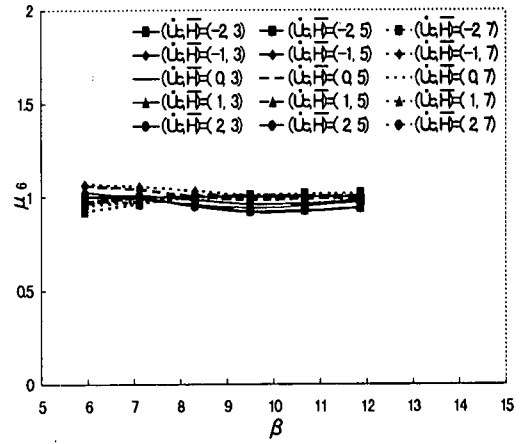


図-18 波力の動的応答倍率に及ぼす潮流の影響(柱径2m)

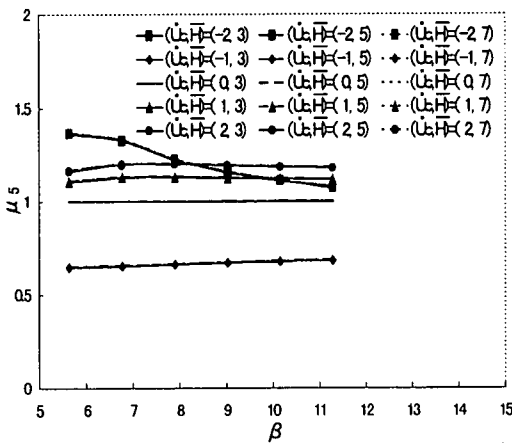


図-16 慣性力の動的応答倍率に及ぼす潮流の影響(柱径3m)

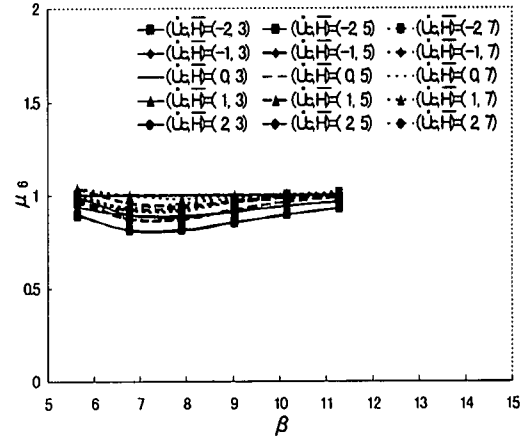


図-19 波力の動的応答倍率に及ぼす潮流の影響(柱径3m)

の結果と同様、 $v_3$  に対して、平均波高の影響はほとんど無く、部材径の違いによる影響も少ないことが分かる。

一方、慣性力による動的応答倍率に及ぼす潮流の影響を表わす指標  $\mu_5$  と波浪条件との関係を図-15 と図-16 に示す。図-15 は柱径が 2m の場合を示し、図-16 は柱径が 3m の場合を示す。各図の凡例は、潮流の流速  $\dot{U}_c$  と平均波高  $\bar{H}$  の組合せ  $(\dot{U}_c, \bar{H})$  を示している。

図-15 と図-16 より、潮流の流速が正值の場合と負値の場合とでは  $\mu_5$  の分布の様子が異なるが、 $\mu_5$  は、平均波高とは無関係に潮流の流速毎に  $\beta$  に対して分布し、柱径の変化の影響を若干受けることが分かる。

### (6) 2 つの力が同時に作用する場合の応答倍率

著者らは、2 つの力が同時に作用する場合の応答倍率  $v_6$  について検討を行い、 $v_6$  に対して平均波高、部材径や構造物の違いはほとんど影響せず、 $v_6$  がほぼ一定値となることを示した<sup>3)</sup>。図-8 に示す鋼製海洋構造物の解析モデルを用いて、波浪条件と  $v_6$  との関係を検討した結果を図-17 に示す。図の凡例は、柱径  $D$  と平均波高  $\bar{H}$  の組合せ  $(D, \bar{H})$  を示している。図-17 より、文献 3) での結果と同様、 $v_6$  がほぼ一定値になることが分かる。

一方、2 つの力が同時に作用した場合の動的応答倍率に及ぼす潮流の影響を表わす指標  $\mu_6$  と波浪条件との関係を図-18 と図-19 に示す。図-18 は柱径が 2m の場合を示し、図-19 は柱径が 3m の場合を示す。各図の凡例は、潮流の流速  $\dot{U}_c$  と平均波高  $\bar{H}$  の組合せ  $(\dot{U}_c, \bar{H})$  を示している。

図-18 と図-19 より、潮流の流速や柱径に関わらず、 $\mu_6$  がほぼ一定値になることが分かる。これは、流体力の非線形特性に及ぼす構造物の応答の影響が少ないことが<sup>3)</sup>、潮流の有無に関わらず成立つことを示していると考えられる。

### (7) 波力荷重による最大応答値解析の解析精度

図-8 に示す解析モデルについて、式(67)に示す波力荷重による曲げモーメントの最大応答値と式(42)から求められる不規則応答曲げモーメントの最大値の期待値とを比較し、波力荷重による最大応答値解析の解析精度の検証を行った。ただし、一様な潮流力による応答は含んでいない。

ここで、 $v_2, \mu_2, v_3, \mu_3$  は海面位置で求めたものを全水深に亘って適用することにした<sup>3)</sup>。また、構造設計時には、同じ骨組構造であれば柱径に関わらず同一の波力補正係数を使用するであろうことを想定して、やや厳密性に欠けるが、 $v_4, \mu_4, v_5, \mu_5, v_6, \mu_6$  には、潮流の流速と平均波高が同じ場合の柱径毎の各

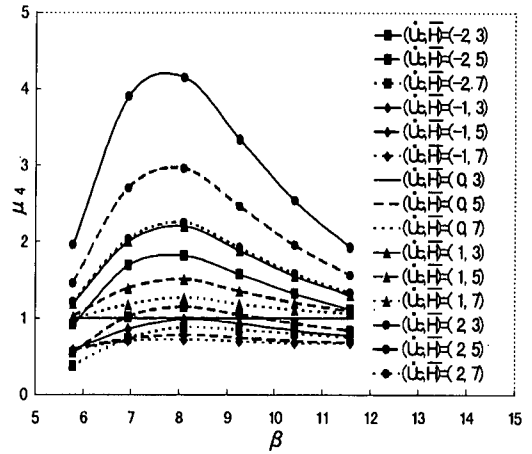


図-20 抗力の動的応答解析に及ぼす潮流の影響(平均値)

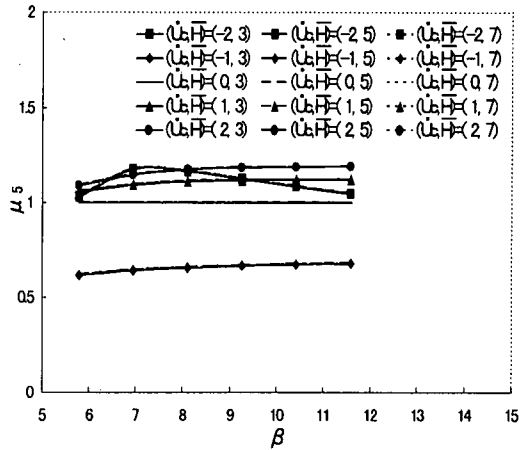


図-21 慣性力の動的応答解析に及ぼす潮流の影響(平均値)

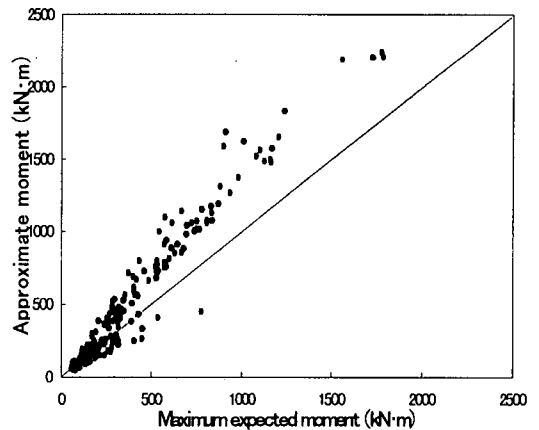


図-22 波力荷重による最大応答値の解析精度

値の平均値を用いることにした<sup>3)</sup>。 $\nu_4, \nu_5, \nu_6, \mu_6$ の値はそれぞれ、0.232, 0.199, 0.751, 1.00であり、 $\mu_4, \mu_5$ の値はそれぞれ図-20と図-21に示す。各図の凡例は、潮流の流速 $\dot{U}_c$ と平均波高 $\bar{H}$ の組合せ $(\dot{U}_c, \bar{H})$ を示している。また、潮流の流速、平均波高と柱径の全ての条件の組合せについて解析精度の検証を行った結果を図-22に示す。

図-22より、やや厳密性に欠ける波力補正係数による波力荷重を用いた最大応答値解析であっても、精度の良い安全側の解析結果が得られることが分かる。これは、 $\nu_4, \mu_4, \nu_5, \mu_5, \nu_6, \mu_6$ に平均値を適用したからと考えられる。

## 7. おわりに

本研究で得られた結果を次に要約する。

- 1) 波高の変動倍率に及ぼす潮流の影響を表わす指標 $\mu_1$ は、平均波高とは無関係に潮流の流速毎に平均周期に対して分布する。潮流の流速が負値の時には $\mu_1$ は1.0より大きくなり、波の形状が鋭くなることを表わす。一方、潮流の流速が正值の時には $\mu_1$ は1.0より小さくなり、波の形状が緩やかになることを表わす。
- 2) 抗力の変動倍率に及ぼす潮流の影響を表わす指標 $\mu_2$ は、潮流の流速と平均波高の組合せ毎に平均周期に対して分布するが、潮流の流速が正值の場合と負値の場合とでは、その分布の傾向が大きく異なる。このことは、波の修正パワースペクトル密度関数が示す性質に依存していると考えられる。また、同じ潮流の流速でも、平均波高毎に $\mu_2$ の値は異なる。このことは、等価線形化された抗力係数が、潮流の効果を含む波による水粒子速度に関する項と、潮流の流速の強度に関する項の和で表わされているからであると考えられる。
- 3) 慣性力の変動倍率に及ぼす潮流の影響を表わす指標 $\mu_3$ は、平均波高とは無関係に潮流の流速毎に平均周期に対して分布する。また、潮流の流速が正值の場合と負値の場合とで、分布の傾向が大きく異なるが、このことは、波の修正パワースペクトルが示す性質に依存していると考えられる。
- 4) 抗力による動的応答倍率に及ぼす潮流の影響を表わす指標 $\mu_4$ は、潮流の流速と平均波高の組合せ毎に平均周期に対して分布する。潮流の流速が正值の場合と負値の場合や、柱径が異なると、 $\mu_4$ の分布の傾向は大きく異なる。このことから、潮流を受ける海洋構造物の場合には、潮流の流速や柱径の変化が応

答に及ぼす影響が大きいことが分かる。

- 5) 慣性力による動的応答倍率に及ぼす潮流の影響を表わす指標 $\mu_5$ は、潮流の流速が正值の場合と負値の場合とでは分布の様子が異なるが、 $\mu_5$ は、平均波高とは無関係に潮流の流速毎に分布し、柱径の変化の影響を若干受ける。
- 6) 2つの力が同時に作用した場合の動的応答倍率に及ぼす潮流の影響を表わす指標 $\mu_6$ は、潮流の流速や柱径に関わらずほぼ一定値となる。これは、流体力の非線形特性に及ぼす構造物の応答の影響が少ないことが、潮流の有無に関わらず成立つことを示している。
- 7) 潮流の流速と平均波高の組み合わせ毎の波力補正係数の平均値による波力荷重を用いれば、精度の良い安全側の最大応答値が得られる。
- 8) 式(67)で示した波力荷重を用いれば、静的解析により使用期間中に発生しうる最大曲げモーメントの期待値が求められるので、確率論的裏付けに基づいた海洋構造物の設計を容易に行うことができる。

## 付録

波力と潮流力を同時に受ける海洋構造物の運動方程式を節点の変位ベクトル $\{X\}$ を用いて、次のように表わす。

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{P\} \quad (A1)$$

ここで $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスであり、 $\{P\}$ は波と潮流による外力を表わすベクトルである。モリソン式に従えば、 $\{P\}$ は波による水粒子の速度ベクトル $\{\dot{V}_w\}$ 、加速度ベクトル $\{\ddot{V}_w\}$ と潮流による水粒子の速度ベクトル $\{\dot{V}_c\}$ を用いて次のように表わすことができる。ただし、本研究では、付加質量と排水質量を区別して扱う。

$$\{P\} = [C_A]\{\ddot{V}_w\} + [C_M]\{\dot{V}_w\} + [C_D]\{(\dot{V}_c + \dot{V}_w) \|\dot{V}_c + \dot{V}_w\}\} \quad (A2)$$

ここで、 $[C_A] = [\cdot \rho (K_M - 1) V \cdot \cdot]$ 、 $[C_M] = [\cdot \rho V \cdot \cdot]$ 、 $[C_D] = [\cdot \rho K_D A \cdot \cdot]$ であり、 $\rho$ ：海水の密度、 $K_M$ ：質量係数、 $V$ ：水粒子の運動方向に投影した構造物の体積、 $K_D$ ：抗力係数、 $A$ ：水粒子の運動方向に投影した構造物の面積である。

ここで、小さな波数  $\kappa$  を有する波では、水粒子の速度や加速度は、構造物の変形の数値や加速度とは無関係に、海中の水粒子の位置に応じて十分な精度で求められるので、波数  $\kappa$  の関数として与えられるものとする。また、潮流の速度は、水深や構造物の応答とは無関係な時間的変動のない一定値であるとする。

$$\{\dot{V}_u\} = \{\dot{V}_o(\kappa)\}, \quad \{\ddot{V}_u\} = \{\ddot{V}_o(\kappa)\} \quad (A3)$$

$$\{\dot{V}_c\} = \text{const.} \quad (A4)$$

式(A1)に、式(A2), (A3), (A4)を代入するとともに、構造物と波による水粒子位置との相対変位ベクトル  $\{r\} = \{V_o\} - \{X\}$  を代入し、それが平均値 0 の正規分布に従うとして、非線形抗力項を等価線形化抗力項に置換する際の誤差を最小化して次の運動方程式を得る。

$$[M + C_A]\{\ddot{X}\} + [\tilde{C}]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = [C'_M]\{\dot{V}_o\} + [\tilde{C}_D]\{\dot{V}_c\} \quad (A5)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \tilde{C}_{ij} &= C_{ij} \quad (i \neq j \text{ のとき}) \\ \tilde{C}_{ij} & \quad (i = j \text{ のとき}) \end{aligned} \quad (A6a)$$

$$\tilde{C}_{ij} = C_{ij} + C_{Dj} \frac{\langle \dot{r}_j(\dot{V}_{oj} + \dot{r}_j) | \dot{V}_{oj} + \dot{r}_j \rangle}{\langle \dot{r}_j^2 \rangle} \quad (A6b)$$

$[C'_M] = [\cdot \rho K_M V \cdot]$  である。  $\langle \quad \rangle$  は時間平均であり、次のように計算できる。

$$\frac{\langle \dot{r}_j(\dot{V}_{oj} + \dot{r}_j) | \dot{V}_{oj} + \dot{r}_j \rangle}{\langle \dot{r}_j^2 \rangle} = 4\{\sigma_{r_j}^2 z(\dot{V}_{oj}) + |\dot{V}_{oj}| Z(\dot{V}_{oj})\} \quad (A7a)$$

$$z(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{r_j}^2}} \exp\left[-\frac{t^2}{2\sigma_{r_j}^2}\right] \quad (A7b)$$

$$Z(\dot{V}_{oj}) = \int_0^{\dot{V}_{oj}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{r_j}^2}} \exp\left[-\frac{\dot{r}^2}{2\sigma_{r_j}^2}\right] d\dot{r} = \int_0^{\dot{V}_{oj}} z(t) dt \quad (A7c)$$

これらより、等価線形化された減衰項と抗力項を次のように表わすことができる。

$$\tilde{C}_{ij} = C_{ij} + 4C_{Dj} \left\{ \sigma_{r_j}^2 z(\dot{V}_{oj}) + |\dot{V}_{oj}| Z(\dot{V}_{oj}) \right\} \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (A8)$$

$$\tilde{C}_{Dij} = 0 \quad (i \neq j)$$

$$= 4C_{Dj} \left\{ \sigma_{r_j}^2 z(\dot{V}_{oj}) + |\dot{V}_{oj}| Z(\dot{V}_{oj}) \right\} \quad (i = j) \quad (A9)$$

また、抗力項を等価線形化する際に、外力  $\{P\}$  のう

ち潮流力に相当する時間的に変動のない力の成分が除去されている。式(A1)は線形同次方程式であるから、式(A2)の波と潮流による力のうち、時間的変動のない潮流力とそれ以外の力とは分離して計算することができる。これより、対象となる海洋構造物の全応答値は式(A5)の運動方程式から得られる動的応答値に、時間的変動のない潮流力による静的応答値  $\{X_s\}$  を加えたものになる。

$$[K]\{X_s\} = [C_D]\{\dot{V}_c\} \quad (A10)$$

次に、海洋構造物の動的応答値を、不規則振動論の手法に則って求める。海洋構造物の変位の共分散マトリックス  $E[\{X\}\{X\}^T]$  は、次のように求められる。

$$E[\{X\}\{X\}^T] = \int_{-\infty}^{\infty} [\Psi] [\cdot \cdot H(\omega) \cdot \cdot] [\Psi] [S_{PP}(\omega)] [\Psi]^T [\cdot \cdot H(\omega) \cdot \cdot] [\Psi]^T d\omega \quad (A11a)$$

$$\begin{aligned} [\cdot \cdot H(\omega) \cdot \cdot] &= [\cdot \cdot \omega^2 - \omega_i^2 + 2i\zeta_i \omega_i \omega \cdot \cdot]^{-1}, \\ [\cdot \cdot H^*(\omega) \cdot \cdot] &= [\cdot \cdot H(-\omega) \cdot \cdot] \end{aligned} \quad (A11b)$$

$[\Psi]$  は規準化したモーダルマトリックスである。

式(A11a)右辺の  $[S_{PP}(\omega)]$  は、潮流の効果を含む等価線形化された波力による外力のパワースペクトルマトリックスであり、左辺の対角項の正の平方根が rms 応答変位である。外力のパワースペクトルマトリックスは次のように求めた。

$$[S_{PP}(\omega)] = \int_{-\infty}^{\infty} [R_{PP}(\tau)] e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (A12)$$

$$[R_{PP}(\tau)] = \left\langle \{\bar{P}(t)\} \{\bar{P}(t+\tau)\}^T \right\rangle \quad (A13)$$

$$\bar{P}_i(t) = C'_{Mi} \dot{V}_{oi}(t) + \tilde{C}_{Di} V_{oi}(t) \quad (A14)$$

ここで、 $[R_{PP}(\tau)]$  は相関マトリックスであり、波力と潮流力による外力のパワースペクトルマトリックスの一般項を、次のように表わすことができる。

$$S_{\bar{P}_i \bar{P}_j}(\omega) = C'_{Mi} C'_{Mj} S_{V_{oi} V_{oj}}(\omega) + \tilde{C}_{Di} \tilde{C}_{Dj} S_{V_{oi} V_{oj}}(\omega) \quad (A15)$$

尚、式(A15)では、次に示す微小振幅波理論で表した水粒子の速度と加速度の相関係数の関係を用いた。

$$R_{V_{oi} V_{oj}}(-\tau) = R_{V_{oi} V_{oj}}(\tau) \quad (A16)$$

## 参考文献

- 1) Malhotra, A. K. and Penzien, J.: Nondeterministic analysis of offshore structures, Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of ASCE, EM6, pp. 985-1003, 1970.
- 2) Kawano, K., Venkataramana, K., Hashimoto, T. and Taniguchi, T.: Dynamic response analysis of semi float type offshore platform, Proceedings of 7<sup>th</sup> (1997) International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 485-492, 1997.
- 3) 谷口朋代, 河野健二: 海洋構造物の設計用波力荷重による動的応答の評価に関する研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp. 961-970, 1998.
- 4) 谷口朋代, 河野健二: 波-潮流-構造物の相互作用を考慮した有脚式海洋構造物の不規則応答解析, 土木学会論文集, No.661/1-53, pp. 141-150, 2000.
- 5) Tung, C. C. and Huang, N. E.: Combined effects of current and waves on fluid force, Ocean Engineering, Vol. 2, pp. 183-193, 1973.
- 6) Vanmarcke, E. H.: On the distribution of the first-passage time for normal stationary random process, Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol. 42, pp. 215-220, 1975.
- 7) Huang, N. E., Chen, D. T., Tung, C. C. and Smith, J. R.: Interactions between steady non-uniform currents and gravity waves with applications for current measurements, Journal of Physical Oceanography, Vol. 2, pp. 420-431, 1972.
- 8) Bretschneider, C. L.: Sea motion and wave forecasting, Handbook of Ocean and Underwater Engineering, McGraw-Hill, 1969.

(1999.12.27 受付)

## DYNAMIC RESPONSE ESTIMATION OF OFFSHORE STRUCTURES BY DESIGN WAVE LOADS WITH CURRENT EFFECT

Tomoyo TANIGUCHI and Kenji KAWANO

The design wave loads on offshore structures subjected to both the current and the wave is examined with a random vibration approach. To ensure their extreme value adequately is essential to design them reasonably. Although random vibration analysis which is corroborated by reliability provides accurate estimation of the structural response, it is obviously impractical to carry out it in the design process. In this study, the design wave loads with current effect which corresponds to the static analysis design scheme is examined based on the maximum expected value of wave forces and structural responses.