

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

DYNAMIC RESPONSE ESTIMATION OF OFFSHORE STRUCTURE DUE TO DESIGN WAVE LOAD

谷口 朋代*、河野健二**

Tomoyo TANIGUCHI and Kenji KAWANO

*工修 鹿児島大学大学院工学研究科環境システム情報工学専攻
(〒675-01 兵庫県加古郡播磨町新島8番地 川崎重工業(株)播磨工場)

**工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科 (〒890 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-40)

An adequate estimation of wave load to offshore structure is essential to evaluate its stability in its future usage. Despite uncertainty relevant to its extreme value, static wave load based on Morison's equation is conventionally used in design process because of its usefulness. Though random vibration analysis provides accurate estimation of structural response corroborated reliability, it is obviously inefficient to analyze dynamic response in each design step. In this study, a design wave load in static analysis is examined to ensure efficiency of design process and reliability of structure simultaneously. It is suggested that the maximum value of the dynamic response of the offshore structure can be evaluated with the approximate maximum wave force based on static analysis.

Key Words: offshore structure, random vibration, design wave load, maximum expect value

1. はじめに

海洋構造物は波力を受け不規則な応答を示す。構造物の健全性は、その使用期間中に発生しうる最大応答値に対して確率論的な裏付けをもって保証されるべきであるので、海洋構造物の設計に用いる波力荷重は、その効果が強く反映されたものになると考えられる。現在の設計用波力荷重は、単柱に規則波が作用した場合の波力を記述するモリソン式から導かれる静的波力を用いるのが一般的であり^{1), 2)}、他の荷重と組み合わせて静的解析を行える等の非常に有効な方法となっている。しかし、構造物の使用期間中に発生しうる最大波力及び最大応答値との関連が明確でない点が問題である。一方、不規則に変動する波力を受ける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³⁾、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^{4), 5)}。しかし、構造設計時に動的応答解析を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。本研究では、耐風設計に用いられた手法を参考にして⁶⁾、変動する波力または動的応答値の最大値の期待値と、静的波力または静的応答値とを比較して、海洋構造物の構造設計に適した波力荷重を評価

する方法を考案し検討を加えた。また、補正係数の性質や波力荷重による最大応答値の解析精度の評価とともに、断面変更が補正係数に与える影響について検討し、断面変更時の対応方法について検討を加えた。

2. 波力荷重の基本形の設定とその補正方針

従来の設計で用いられている静的波力は、モリソン式からも分かるように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。本研究ではモリソン式や従来の設計用静的波力を参考にして、任意の水深 y における単柱に作用する単位長さ当たりの静的波力 $F_B(y)$ を次式で定義した。

$$F_B(y) = F_D(y) + F_I(y) \\ = \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}^2(y) + \rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{U}(y) \quad (1)$$

ここで、

$F_D(y)$: 抗力, $F_I(y)$: 慣性力

C_d, C_m : 抗力係数, 質量係数

ρ : 海水の密度

D : 円柱の直径

水平方向の水粒子の運動は、波高 H 、周期 T の規則波を想定して微小振幅波理論で表した。

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

$$\ddot{U}(y) = \Omega^2 \frac{\cosh ky}{\sinh kh} \frac{H}{2} \quad (3)$$

$$\Omega = \frac{2\pi}{T}, \kappa = \frac{\Omega^2}{g}, g: \text{重力加速度} \quad (4)$$

同様に鉛直方向の水粒子の運動に関しては、

$$\dot{U}(y) = \Omega \frac{\sinh ky}{\sinh kh} \frac{H}{2} \quad (5)$$

$$\ddot{U}(y) = \Omega^2 \frac{\sinh ky}{\sinh kh} \frac{H}{2} \quad (6)$$

波高や周期は波の状態を示す特性値であり、最大有義波に対する最高波の波高や周期等を用いることが多いが、本研究では海洋構造物の設計波浪条件が海面上昇量の変動を示すパワースペクトル密度関数で与えられることを仮定し、かつ変動倍率を用いた波力の補正が容易に行えるように、特性値の基準値として平均波高 \bar{H} 及び平均周期 \bar{T} を用いることにした。

海洋構造物の設計に用いる波力荷重は(1)式を基本形とし、以下の検討より得られる補正係数を(1)式に乗じて算定することにした。

- 1) 波高の変動倍率による波高補正係数
- 2) 抗力、慣性力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

波高の変動倍率は基準値となる波高と波高の最大値の期待値との比であり、波力の変動倍率は静的波力と波力の最大値の期待値との比である。また、動的応答倍率は静的波力による構造物の静的応答値と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静的波力を用いるのは、波力の時間平均値が0であることを考慮するためである。また、各倍率を求める際に用いる評価時間は⁹⁾、任意の限界値と応答非超過確率を用いた信頼性解析より求めた。

尚、本研究は波が微小振幅波理論及び深海波としての取扱い ($\tanh kh = 1$) が可能であり、海面上昇量の変動が平均波高 \bar{H} 、平均周期 \bar{T} をパラメータにした Bretschneider 型のパワースペクトル密度関数⁹⁾で表される範囲で行った。ただし、波のパワースペクトル密度関数の空間的広がりには考慮していない。

3. 波高の変動倍率による波高補正係数

構造物の使用期間中に発生しうる波高の最大値の期待値は、波高の変動倍率より求められ、波浪のパワースペクトル密度関数にのみ依存する値となる。即ち、海面上昇量の変動をパワースペクトル密度関数 $S_{\eta\eta}(\omega)$ で表すと波高の二乗平均値(rms 値)は次式で与えられる。

$$H_{rms}^2 = \int_0^{\infty} S_{\eta\eta}(\omega) d\omega \quad (7)$$

ここで Bretschneider 型のパワースペクトル密度関数を

用いると、

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \left(\frac{A}{\omega^5}\right) \exp\left(-\frac{B}{\omega^4}\right) \quad (8)$$

$$A = 4210 \left(\frac{\bar{H}}{\bar{T}^2}\right)^2, B = \frac{1052}{\bar{T}^4} \quad (9)$$

と表される。

応答値が任意の限界値を超過しない確率 $L_1(\gamma)$ は、初期通過確率により、補正係数 C_1 を含んだ形で表される。

$$L_1(\gamma) = \exp\left[-\frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_0}} T_1 \exp\left(\frac{-\gamma^2}{2}\right) C_1\right] \quad (10)$$

$$C_1 = \frac{1 - \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{2}} q_x \cdot \gamma\right)}{1 - \exp\left(\frac{-\gamma^2}{2}\right)} \quad (11)$$

$$q_x = \left(1 - \frac{\alpha_1^2}{\alpha_0 \alpha_2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$\alpha_i = \int_0^{\infty} \omega^i S_{\eta\eta}(\omega) d\omega \quad (i = 0, 1, 2) \quad (13)$$

任意の限界値に対する応答非超過確率を満たす評価時間 T_1 を用いて、波高の変動倍率 v_1 を波高補正係数と同次元で次のように定義する。

$$H_{rms} = \frac{v_1 \bar{H}}{g_1} \quad (14)$$

ここで、

$$g_1 = \sqrt{2 \ln(n_1 T_1)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(n_1 T_1)}} \quad (15)$$

$$n_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} \omega^2 S_{\eta\eta}(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} S_{\eta\eta}(\omega) d\omega}} \quad (16)$$

静的波力の波高の特性値 H には、波高の基準値である平均波高 \bar{H} に変動倍率 v_1 を乗じて求められる波高の最大値を用いることにした。

$$H = v_1 \bar{H} \quad (17)$$

一方、波の周期についても種々の出現頻度分布が提案されているが、狭帯域の不規則波では周期はあまり広い範囲では分布せず代表波の間に次の関係が成り立つことから¹⁰⁾、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この関係を用いることにした。

$$T = T_{\max} \approx T_{1/10} \approx T_{1/3} \approx 1.1 \bar{T} \quad (18)$$

4. 抗力及び慣性力の変動倍率による波力補正係数

モリソン式で表される波力の中で、抗力は水粒子の速度の二乗に比例し、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

値にはならないことや、比較的剛と見なせる構造物への適用を考慮して、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。単柱に作用する単位長さ当たりの波力のパワースペクトル密度関数 $S_f(\omega)$ は次式で表される¹¹⁾。

$$S_f(\omega) = S_{fd}(\omega) + S_{fi}(\omega) \quad (19)$$

$S_{fd}(\omega)$: 抗力のパワースペクトル密度関数

$S_{fi}(\omega)$: 慣性力のパワースペクトル密度関数

$$S_{fd}(\omega) = \left(\frac{1}{2} \rho C_d D \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_u \right)^2 S_{uu}(\omega) \quad (20)$$

$$S_{fi}(\omega) = \left(\rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \right)^2 S_{uu}(\omega) \quad (21)$$

$$S_{uu}(\omega) = \omega^2 S_{\dot{u}\dot{u}}(\omega) \quad (22)$$

$$S_{\dot{u}\dot{u}}(\omega) = -S_{\ddot{u}\ddot{u}}(\omega) = i\omega S_{u\dot{u}}(\omega) \quad (23)$$

水粒子の水平方向の運動に対して、

$$S_{u\dot{u}}(\omega) = \omega^2 \frac{\cosh^2 ky}{\sinh^2 kh} S_{\eta\dot{\eta}}(\omega) \quad (24)$$

水粒子の鉛直方向の運動に対して、

$$S_{\dot{u}\dot{u}}(\omega) = \omega^2 \frac{\sinh^2 ky}{\sinh^2 kh} S_{\eta\dot{\eta}}(\omega) \quad (25)$$

抗力と慣性力それぞれの変動倍率は、(20)式と(21)式から求められる最大波力の期待値と水粒子速度または加速度の最大値を用いた静的抗力または静的慣性力との比として、波高の変動倍率と同様の手順で求めることができる。本研究では、最も代表的な断面である円形断面について変動倍率を求めることにした。

4.1 抗力の場合

抗力のパワースペクトル密度関数から得られる抗力の rms 値と静的抗力はそれぞれ次式で表される。

$$F_{D,rms}^2 = \int_0^\infty S_{fd}(\omega) d\omega \quad (26)$$

$$F_{D,static} = \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}^2 \quad (27)$$

ここで \dot{U} は水粒子速度の最大値であり、(17)式に示す波高の最大値を(2)式に代入して次のように求めることにした。

$$\dot{U}(y) = \Omega \frac{\cosh ky}{\sinh kh} \frac{v_1 \bar{H}}{2} \quad (28)$$

$$\Omega = \frac{2\pi}{1.1T}, \kappa = \frac{\Omega^2}{g}, g: \text{重力加速度} \quad (29)$$

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。

$$F_{D,rms} = \frac{v_2}{g_2} F_{D,static} \quad (30)$$

従って(20)、(26)、(27)式を(30)式に代入して、抗力の変動倍率 v_2 を水粒子速度との関係として次のように求めることができる。

$$\sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_u^2 = \frac{v_2 \dot{U}^2}{g_2} \quad (31)$$

ここで σ_u は水粒子速度の rms 値であり、

$$g_2 = \sqrt{2 \ln(n_2 T_2)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(n_2 T_2)}} \quad (32)$$

$$n_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\int_0^\infty \omega^2 S_{fd}(\omega) d\omega}{\int_0^\infty S_{fd}(\omega) d\omega}} \quad (33)$$

評価時間 T_2 は、次式に示す係数 α_i を用いて、(10)、(11)、(12)式に示す任意の限界値に対する応答非超過確率を満たすように求めた。

$$\alpha_i = \int_0^\infty \omega^i S_{fd}(\omega) d\omega \quad (i=0, 1, 2) \quad (34)$$

これより静的抗力の最大値 F_D' を、(27)式の静的抗力に(31)式の変動倍率 v_2 を乗じて表すことができる。

$$F_D' = v_2 \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}^2 \quad (35)$$

4.2 慣性力の場合

これまでと同様に、慣性力のパワースペクトル密度関数から得られる慣性力の rms 値と静的慣性力はそれぞれ次式で表される。

$$F_{I,rms}^2 = \int_0^\infty S_{fi}(\omega) d\omega \quad (36)$$

$$F_{I,static} = \rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{U} \quad (37)$$

ここで \ddot{U} は水粒子加速度の最大値であり、(17)式に示す波高の最大値を(3)式へ代入して次のように求めることにした。

$$\ddot{U}(y) = \Omega^2 \frac{\cosh ky}{\sinh kh} \frac{v_1 \bar{H}}{2} \quad (38)$$

ここで角周波数 Ω や波数 κ は(29)式を用いる。

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。

$$F_{I,rms} = \frac{v_3}{g_3} F_{I,static} \quad (39)$$

従って(21)、(36)、(37)式を(39)式に代入して、慣性力の変動倍率 v_3 を水粒子加速度との関係として次のように求めることができる。

$$\sigma_{\ddot{u}} = \frac{v_3 \ddot{U}}{g_3} \quad (40)$$

ここで $\sigma_{\ddot{u}}$ は水粒子加速度の rms 値であり、

$$g_3 = \sqrt{2 \ln(n_3 T_3)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(n_3 T_3)}} \quad (41)$$

$$n_3 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\int_0^\infty \omega^2 S_{fi}(\omega) d\omega}{\int_0^\infty S_{fi}(\omega) d\omega}} \quad (42)$$

評価時間 T_3 は、次式に示す係数 α_i を用いて、(10)、(11)、(12)式に示す任意の限界値に対する応答非超過確率を満たすように求めた。

たすように求めた。

$$\alpha_i = \int_0^\infty \omega^i S_{f_i}(\omega) d\omega \quad (i=0, 1, 2) \quad (43)$$

これより静的慣性力の最大値 F'_I を、(37)式の静的抗力に(40)式の変動倍率 v_3 を乗じて表すことができる。

$$F'_I = v_3 \rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \dot{U} \quad (44)$$

5. 不規則応答特性による波力補正係数

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。一般に可撓性を有する海洋構造物では、構造物の不規則応答特性を検討する必要があると考えられる。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。一般に海洋構造物の不規則振動解析は、次式で表わされる運動方程式に基づいて行われる^{12), 13)}。

$$\left(m + \rho C_{m1} \frac{\pi}{4} D^2\right) \ddot{x} + \left(c + \frac{1}{2} \rho C_d D \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_r\right) \dot{x} + kx = \frac{1}{2} \rho C_d D \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_r \dot{u}(t) + \rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{u}(t) \quad (45)$$

ここで $C_{m1} = C_m - 1$, $\dot{r} = \dot{u} - \dot{x}$ であり、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、抗力、慣性力それぞれの力に対する波力補正係数だけでは、2つの力が同時に作用した場合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、次の3つの波力補正係数を用いることにした。

- 1) 抗力が卓越する場合の構造物の動的応答特性に関する波力補正係数
- 2) 慣性力が卓越する場合の構造物の動的応答特性に関する波力補正係数
- 3) 2つの力が同時に作用した場合の構造物の動的応答特性に関する波力補正係数

1)及び2)は前章と同様、抗力及び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、3)は、抗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。動的応答倍率は、(45)式の rms 応答値と(35), (44)式の静的抗力または静的慣性力の最大値による静的応答値との比として、これまでと同様の手順で求めることにした。

5.1 抗力が卓越する場合

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。

$$M(S_{fd}(\omega))_{rms} = \frac{v_4}{g_4} M(F'_D)_{static} \quad (46)$$

$M(S_{fd}(\omega))_{rms}$: (20)式で表され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

$M(F'_D)_{static}$: (35)式で表される静的抗力の最大値による構造物の静的モーメント値

ここで、

$$g_4 = \sqrt{2 \ln(n_4 T_4)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(n_4 T_4)}} \quad (47)$$

$$n_4 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\int_0^\infty \omega^2 M(S_{fd}(\omega)) d\omega}{\int_0^\infty M(S_{fd}(\omega)) d\omega}} \quad (48)$$

評価時間 T_4 は、次式に示す係数 α_i を用いて、(10), (11), (12)式に示す任意の限界値に対する応答非超過確率を満たすように求めた。

$$\alpha_i = \int_0^\infty \omega^i M(S_{fd}(\omega)) d\omega \quad (i=0, 1, 2) \quad (49)$$

尚、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。

これより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、(35)式の静的抗力の最大値に(46)式の動的応答倍率 v_4 を乗じて補正した静的抗力 F''_D を荷重とする静的解析によって得ることができる。

$$F''_D = v_4 v_2 \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}^2 \quad (50)$$

5.2 慣性力が卓越する場合

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。

$$M(S_{fi}(\omega))_{rms} = \frac{v_5}{g_5} M(F'_I)_{static} \quad (51)$$

$M(S_{fi}(\omega))_{rms}$: (21)式で表され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

$M(F'_I)_{static}$: (44)式で表される静的慣性力の最大値による構造物の静的モーメント値

ここで、

$$g_5 = \sqrt{2 \ln(n_5 T_5)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(n_5 T_5)}} \quad (52)$$

$$n_5 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\int_0^\infty \omega^2 M(S_{fi}(\omega)) d\omega}{\int_0^\infty M(S_{fi}(\omega)) d\omega}} \quad (53)$$

評価時間 T_5 は、 T_4 と同様求める。

これより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、(44)式の静的慣性力の最大値に(51)式の動的応答倍率 v_5 を乗じて補正した静的慣性力 F''_I を荷重とする静的解析によって得ることができる。

$$F''_I = v_5 v_3 \rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \dot{U} \quad (54)$$

5.3 2つの力が同時に作用する場合

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 v_6 を、波力補正係数と同次元で次のように定義する。

$$M(S_{ff}(\omega))_{rms} = \frac{v_6}{g_6} M(F_B''_{static}) \quad (55)$$

$M(S_{ff}(\omega))_{rms}$: (19)式で表される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

$M(F_B''_{static})$: 抗力及び慣性力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、

$$g_6 = \sqrt{2 \ln(n_6 T_6)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(n_6 T_6)}} \quad (56)$$

$$n_6 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\int_0^\infty \omega^2 M(S_{ff}(\omega)) d\omega}{\int_0^\infty M(S_{ff}(\omega)) d\omega}} \quad (57)$$

評価時間 T_6 は、 T_4 と同様求める。

ここで $M(F_B''_{static})$ は、動的応答倍率を乗じて補正された静的抗力 F_B'' 及び静的慣性力 F_I'' の和を荷重とする静的解析によって得られる静的曲げモーメント値に等しいことから F_B'' を次のように表すことができる。

$$F_B'' = v_4 v_2 \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}^2 + v_5 v_3 \rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{U} \quad (58)$$

よって波力による不規則応答の最大値の期待値を、(58)式の補正された静的抗力及び静的慣性力の和に(55)式の動的応答倍率 v_6 を乗じて補正した静的波力 F_B''' を荷重とする静的解析によって得ることができる。

$$F_B''' = v_6 \left\{ v_4 v_2 \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}^2 + v_5 v_3 \rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{U} \right\} \quad (59)$$

6. 海洋構造物設計用波力荷重とその補正係数の特徴

これまでに波高補正係数及び波力補正係数を用いて任意の水深 y における海洋構造物設計用波力荷重 $F(y)_{Design}$ を導く方法を示した。 $F(y)_{Design}$ は(59)式を書き改めて、

$$F(y)_{Design} = v_6 \left\{ v_4 v_2 \frac{1}{2} \rho C_d D \dot{U}^2(y) + v_5 v_3 \rho C_m \frac{\pi}{4} D^2 \ddot{U}(y) \right\} \quad (60)$$

であり、 $\dot{U}(y)$ 、 $\ddot{U}(y)$ は(28)式と(38)式で表される。

設計用波力荷重に用いる補正係数の特徴について数値解析例を以下に示す。尚、各倍率の算定に用いた評価時間は、正規分布の場合を参考にして、(10)式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。

6.1 波高補正係数 v_1

表-1に示す解析条件について、 v_1 を算定した結果を図-1に示す。

図-1より v_1 は、表-1に示す条件においては、 $\bar{T}=6\sim 8$ sec 付近にわずかな変動を有するのみで各 \bar{H} 毎の v_1 の値はほぼ一定値であることから、 v_1 の値は \bar{H} 、 \bar{T} の組合せに関わらずその平均値 $v_1=3.45$ を用いることにする。

表-1 波高補正係数解析条件

\bar{H} (m)	\bar{T} (sec)
3	5~15
4	5~15
5	5~15
6	5~15
7	5~15

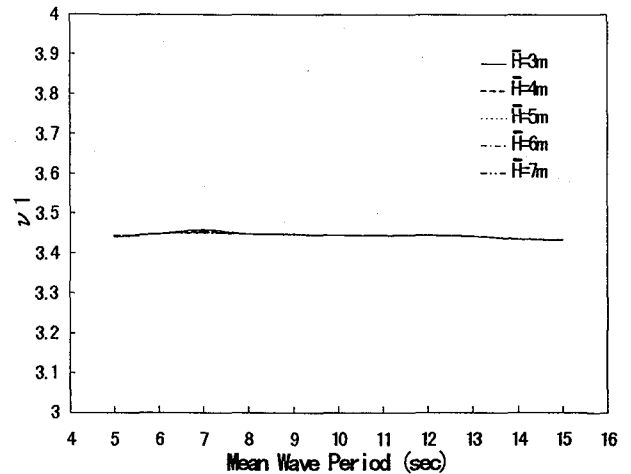


図-1 波高補正係数 v_1

6.2 波力補正係数 v_2 、 v_3

表-2に示す解析条件について、海面位置で v_2 、 v_3 を算定した結果を図-2及び図-3に示す。

表-2 抗力及び慣性力用波力補正係数解析条件

水深(m)	\bar{H} (m)	\bar{T} (sec)
50~200	3	5~15
50~200	4	5~15
50~200	5	5~15
50~200	6	5~15
50~200	7	5~15

図-2及び図-3より、各 \bar{H} 毎の v_2 、 v_3 の値は水深毎に重なっていることから、 v_2 、 v_3 は表-2に示す条件においては \bar{H} とは無関係に \bar{T} と水深にのみ依存する

値となることがわかる。ここで、水深200mでの v_2 、 v_3 の値は、 \bar{T} に関らず深海波の仮定が成立する範囲内で解析できた結果である。しかし、水深が浅くなるに従い、平均周期の長い波では深海波の仮定が成り立たなくなり、 v_2 、 v_3 の値は深海波の仮定が成立する範囲内で求められた値とは異なってくる。このことは、深海波の仮定で求めた v_2 、 v_3 を、浅い水深へ適用する場合には適用の限界があることを示すと考えられる。

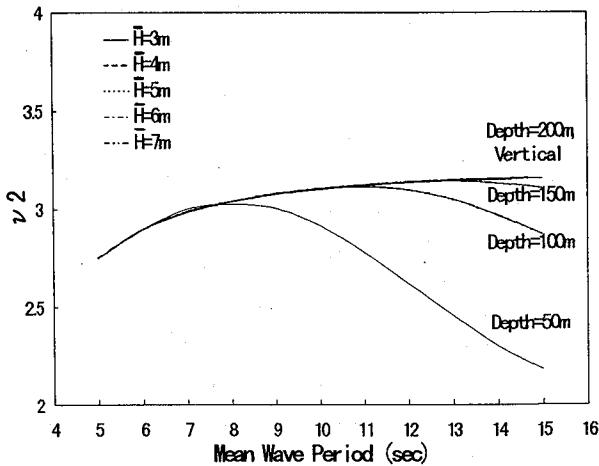


図-2 抗力用波力補正係数 v_2

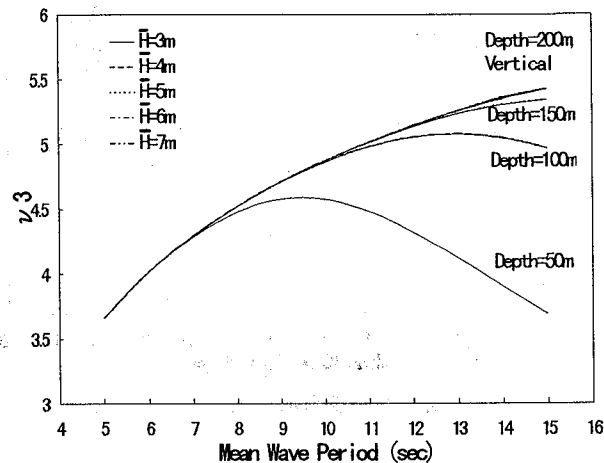


図-3 慣性力用波力補正係数 v_3

一方、抗力の rms 値とその変動倍率 v_2 及び慣性力の rms 値とその変動倍率 v_3 の水深方向の分布を図-4に示す。解析条件は、水深150m、平均波高7m、平均周期12secである。縦軸に水深をとり、各水深における抗力、慣性力及びそれぞれの変動倍率の値をプロットした。但し、縦軸は全水深で、横軸は海面位置での抗力、慣性力及びそれぞれの変動倍率の値で除して正規化してある。

一般に抗力及び慣性力は海面位置で最大となり、水深方向に急激に減少する。抗力及び慣性力の変動倍率は、図-4に示すように水深によって大きく変化することから、波力補正係数は水深毎に設定する必要があることが分かる。しかし、海面位置での波力に比べ相対的に小

さい波力にまで波力補正係数を設定して使い分けることは煩雑であることから、安全側の評価として波力が最大となる海面位置での変動倍率を水深全体に亘って適用することにした。尚、図-2及び図-3において水深200mの v_2 、 v_3 と重なっている Vertical の凡例で示す鉛直方向の抗力及び慣性力に関する変動倍率 v_2 、 v_3 が水深の影響を受けていないのは、海面位置での変動倍率を示しているからである。

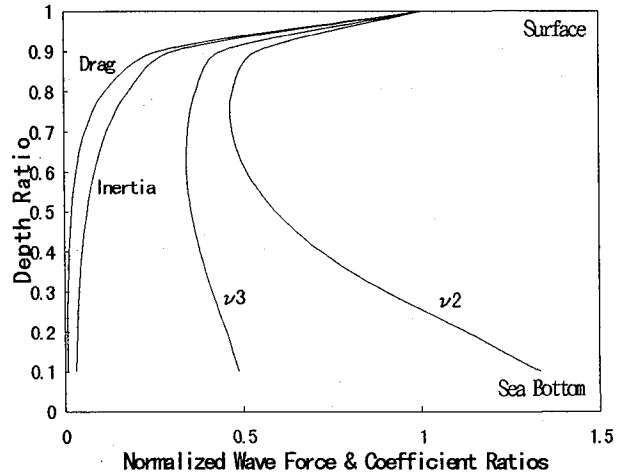


図-4 波力及び波力補正係数の水深方向分布

6.3 波力補正係数 v_4 、 v_5 、 v_6

構造物の不規則振動特性に関する動的応答倍率から求められる波力補正係数 v_4 、 v_5 、 v_6 が示す性質について、構造物の固有振動数 ω_n と波浪のエネルギーが集中する周波数 ω_p との比として振動数比 β を定義し、 β をパラメータにとって整理した。 ω_p は Bretschneider 型のパワースペクトル密度関数の周波数に関する微係数が0となる周波数として定義した。

$$\beta = \frac{\omega_n}{\omega_p} \quad (61)$$

$$\omega_p = \frac{5.386}{\bar{T}} \quad (62)$$

まず、 v_4 、 v_5 、 v_6 の一般的な性質と(60)式で表される波力荷重を用いた最大応答値解析の解析精度について考察を行った。次に、断面変更前の波力荷重を断面変更後の最大応答値解析に適用した場合の解析精度に対する評価から、断面変更に対する v_4 、 v_5 、 v_6 の適用性について考察を加えた。尚、解析は深海波の仮定で求めた v_2 、 v_3 が適用できる範囲内で行い、抗力係数 C_d 及び質量係数 C_m の値には、標準値である $C_d=1.0$ 及び $C_m=2.0$ を用いた¹⁴⁾。また、構造減衰は3%とした。

(1) 波力補正係数 v_4 、 v_5 、 v_6 の性質

図-5に示す解析モデルと表-3に示す解析条件を用いて、 v_4 、 v_5 、 v_6 を求めた結果を図-6～図-8に示す。尚、不規則振動解析では5次モードまでを考慮し

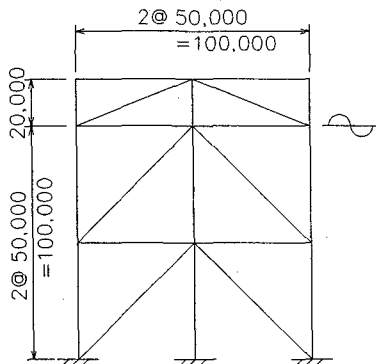
た。

図-6～図-8より、各解析モデル毎の ν_4 , ν_5 , ν_6 は、柱径毎に群を成していることから、波高が ν_4 , ν_5 , ν_6 に及ぼす影響はほとんどなく、かつ柱径毎の群も近接していることから、柱径が ν_4 , ν_5 , ν_6 に及ぼす影響も少ないことが分かる。一方、海洋構造物の固有振動数が近接していても骨組構造別毎に ν_4 , ν_5 , ν_6 は、大きく異なることから、 ν_4 , ν_5 , ν_6 は骨組構造別毎に必要なと考えられる。また、各解析モデル毎の ν_6 が振動数比に関らずほぼ一定値となることは、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という文献(15)に示された海洋構造物の動的応答特性を裏付けているものと考えられる。

表-3 波力補正係数 ν_4 , ν_5 , ν_6 解析条件

	\bar{H} (m)	\bar{T} (sec)	柱部材諸元
Case1	3	5~10	ϕ 2000×t25
Case2	5	5~10	ϕ 2000×t25
Case3	7	5~10	ϕ 2000×t25
Case4	3	5~10	ϕ 3000×t25
Case5	5	5~10	ϕ 3000×t25
Case6	7	5~10	ϕ 3000×t25

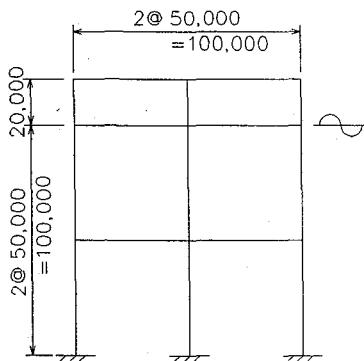
梁部材及び斜材の諸元は ϕ 1000×t15である。



Model-A

ϕ 2000 の時, $\omega_1=21.8\text{rad/sec}$, ($T_1=0.288\text{sec}$)

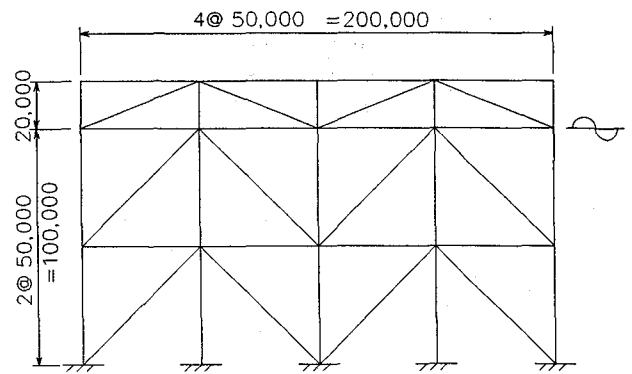
ϕ 3000 の時, $\omega_1=20.1\text{rad/sec}$, ($T_1=0.312\text{sec}$)



Model-B

ϕ 2000 の時, $\omega_1=1.79\text{rad/sec}$, ($T_1=3.51\text{sec}$)

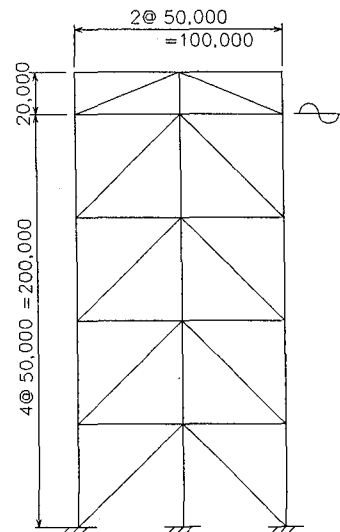
ϕ 3000 の時, $\omega_1=2.30\text{rad/sec}$, ($T_1=2.73\text{sec}$)



Model-C

ϕ 2000 の時, $\omega_1=1.77\text{rad/sec}$, ($T_1=3.55\text{sec}$)

ϕ 3000 の時, $\omega_1=2.28\text{rad/sec}$, ($T_1=2.76\text{sec}$)



Model-D

ϕ 2000 の時, $\omega_1=10.9\text{rad/sec}$, ($T_1=0.576\text{sec}$)

ϕ 3000 の時, $\omega_1=9.86\text{rad/sec}$, ($T_1=0.637\text{sec}$)

図-5 解析モデル図

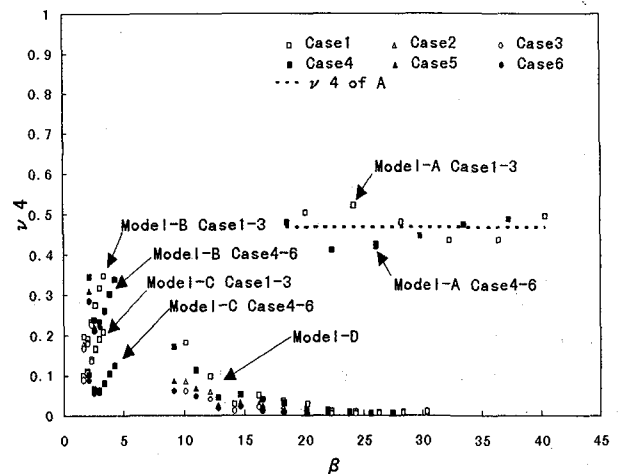


図-6 波力補正係数 ν_4

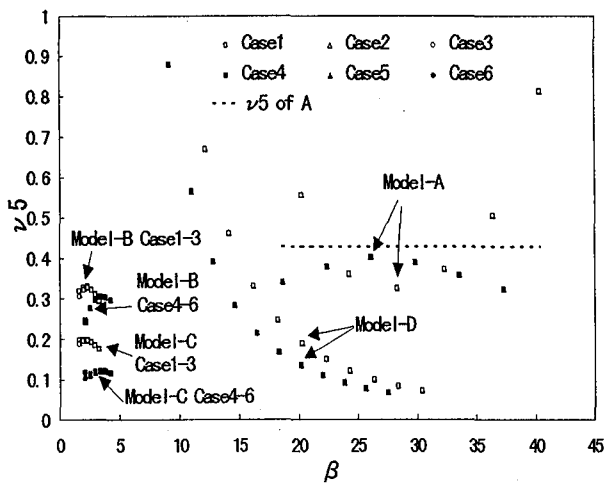


図-7 波力補正係数 ν_5

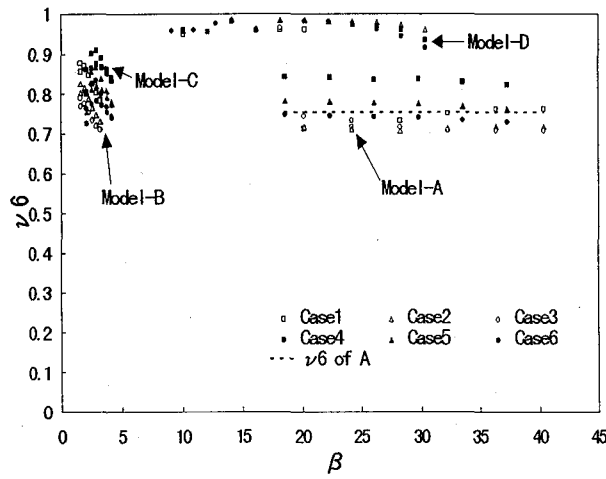


図-8 波力補正係数 ν_6

(2)波力荷重による最大応答値解析の解析精度

図-5に示す解析モデルについて、(60)式に示す波力荷重による曲げモーメントの最大応答値と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。尚、構造設計時には、骨組構造別毎に波力補正係数を使い分けることを想定して、やや厳密性に欠けるが ν_4 , ν_5 , ν_6 として断面諸元に関らず各解析モデルの波力補正係数の平均値を用いることにした。検証に用いた各モデルの ν_4 , ν_5 , ν_6 を表-4に示す。また、Model-Aについては、それらの値を図-6~8中に点線で示す。解析精度の検証結果を図-9に示す。

図-9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、骨組構造や固有振動数に関らず精度の良い解析結果が得られることが分かる。また、本解析の範囲では、Model-Dのように深い水深に設置された構造物では、 ν_4 , ν_5 のばらつきが大きいことが図-6及び図-7から分かる。このように、ばらつきが大きい ν_4 , ν_5 の平均値を用いた最大応答値解析では、解析精度は若干悪くなることが分

かる。

表-4 解析モデルの波力補正係数の平均値

	ν_4	ν_5	ν_6
Model-A	0.466	0.427	0.753
Model-B	0.266	0.302	0.792
Model-C	0.119	0.153	0.809
Model-D	0.028	0.293	0.970

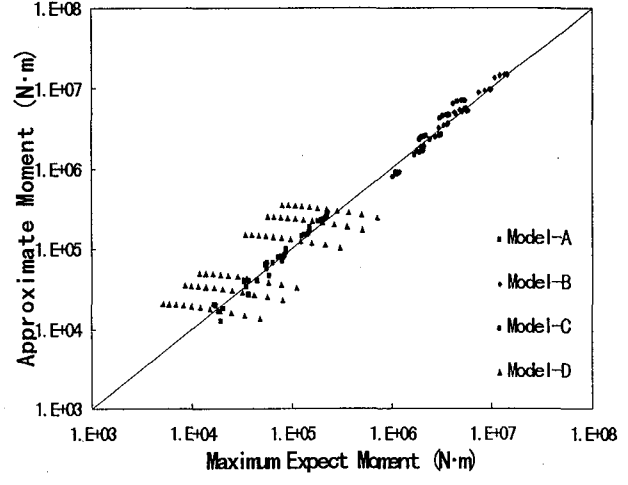


図-9 波力荷重による最大応答値の解析精度

一方、これまでの検討では、正規分布の場合を参考にして、限界値 $\gamma=3$ に対する応答非超過確率が3%になる評価時間を用いて、不規則応答の最大値の期待値を求め、動的応答倍率、波力補正係数及び波力荷重を設定した。このように設定された波力荷重による最大応答値と、評価時間毎の不規則応答の最大値の期待値とを比較して、波浪の継続時間に対する限界値の設定の妥当性を評価した。表-5に示す解析条件と平均波高 5m、平均周期 10sec の波浪条件を用いて、限界値の妥当性を評価した結果を図-10に示す。また、図-10には、応答非超過確率3%及び限界値 $\gamma=3.5$ 及び $\gamma=4$ の場合の波力荷重による最大応答値と評価時間毎の不規則応答の最大値の期待値との比較を合わせて示す。

表-5 限界値の妥当性評価用解析条件

	解析モデル	柱部材諸元
Case-1	Model-A	ϕ 2000×t25
Case-2	Model-A	ϕ 3000×t25
Case-3	Model-B	ϕ 2000×t25
Case-4	Model-B	ϕ 3000×t25
Case-5	Model-C	ϕ 2000×t25
Case-6	Model-C	ϕ 3000×t25
Case-7	Model-D	ϕ 2000×t25
Case-8	Model-D	ϕ 3000×t25

梁部材及び斜材の諸元は ϕ 1000×t15 である。

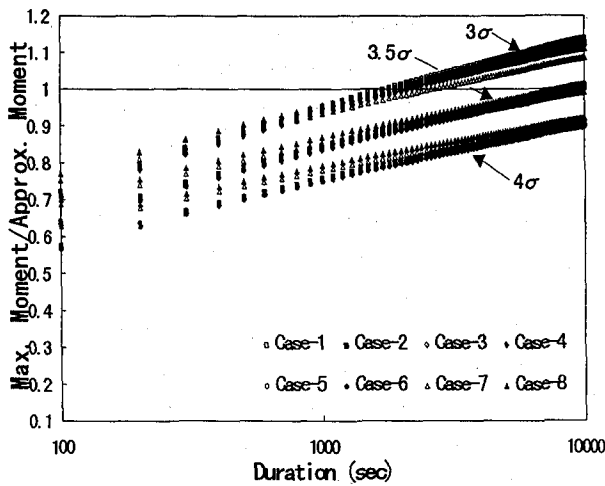


図-10 波力荷重による最大応答値と不規則応答の最大値の期待値

図-10より、評価時間毎の不規則応答の最大値の期待値と最大応答値との比は、解析モデルに関らず限界値毎に同じ傾向を示す。設計の対象となる波力の継続時間を一般的な暴風の継続時間である数時間程度と考えると、これは海洋構造物の固有周期の数千倍程度に相当する。そこで、不規則応答の最大値の期待値を海洋構造物の固有周期の3000倍程度の継続時間に対して設定するとすれば、応答非超過確率3%及び限界値 $\gamma=3.5$ を用いて波力荷重を評価する必要があることが分かる。

(3)断面変更に対する波力補正係数の適用性

図-5のModel-Aと表-6に示す解析条件を用いて、解析モデルの最下段の柱断面が増厚した場合を例として、断面変更前の波力荷重を用いた断面変更後の構造解析の解析精度について評価を行った結果を図-11に示す。但し、 ν_4, ν_5, ν_6 は、やや厳密性に欠けるが、断面諸元に関らず図-6~8中に点線で示したModel-Aに関する波力補正係数の平均値 $\nu_4=0.466, \nu_5=0.427, \nu_6=0.753$ を用いることにした。

表-6 断面変更後の解析精度評価用解析条件

	\bar{H} (m)	\bar{T} (sec)	柱部材諸元	備考
Case1	3~5	5~10	ϕ 2000×t25	変更前
Case2	3~5	5~10	ϕ 2000×t30	
Case3	3~5	5~10	ϕ 2000×t35	
Case4	3~5	5~10	ϕ 3000×t25	変更前
Case5	3~5	5~10	ϕ 3000×t30	
Case6	3~5	5~10	ϕ 3000×t35	

梁部材及び斜材の諸元は ϕ 1000×t15である。

図-11より断面変更前の波力荷重を、断面変更後の最大応答値解析に用いても、安全側の比較的精度の良い解析結果が得られることが分かる。波力補正係数は、厳密には断面変更前と変更後とは異なるが、本解析が対象にした範囲内では、表-6に示すような大幅な断面変更

に対しても、波力補正係数には解析精度に影響を及ぼすような大きな変動は表われなかったと考えられる。

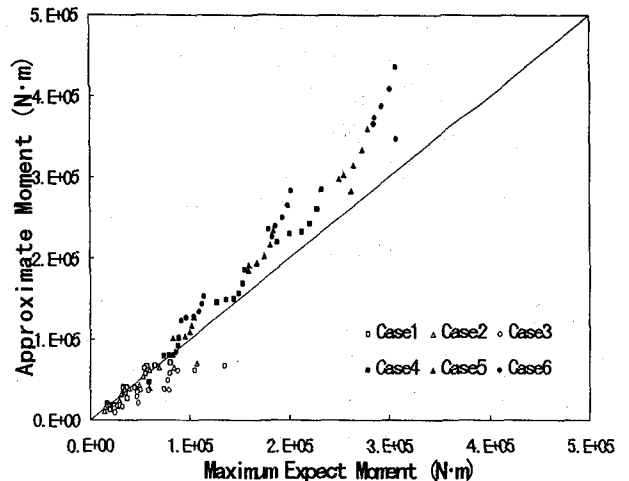


図-11 断面変更後の解析精度の評価

7. おわりに

本研究では海洋構造物の簡便な設計を行う場合を想定して、動的応答解析に基づいて設計用波力荷重の評価方法について検討を加えた。解析で得られた結果を要約すると次のようになる。

- 1) 構造物の使用期間中に発生しうる最大波高は波高の変動倍率 ν_1 から求められ、 ν_1 は波浪のパワースペクトル密度関数にのみ依存し平均波高 \bar{H} 、平均周期 \bar{T} の組み合わせに関らずほぼ一定値である。
- 2) 円形断面に作用する抗力及び慣性力の変動倍率 ν_2, ν_3 は、水粒子速度または加速度の比較に関する関係として求められ、深海波の仮定が成立する範囲では、平均波高 \bar{H} とは無関係に平均周期 \bar{T} と水深に依存する値となる。 ν_2, ν_3 を用いれば、構造物の使用期間中に作用しうる最大波力を求めることができる。
- 3) 動的応答倍率 ν_4, ν_5, ν_6 に対しては、波高の影響はほとんどなく、柱径に関しても影響が少ない。しかし構造物が異なると、固有周期が近接する場合でもそれらは相違した値を示しており、それぞれについて検討する必要がある。
- 4) 動的応答倍率 ν_6 に対して流体力の非線形特性の影響はほとんど現れず、 ν_6 は振動数比に関らずほぼ一定値となる。
- 5) 骨組構造別毎の波力補正係数の平均値による波力荷重を用いれば、精度の良い最大応答値が得られる。ただし、本解析の範囲では、深い水深に設置された構造物の波力補正係数 ν_4, ν_5 のばらつきは大きく、それらを平均値で評価した場合には、波力荷重を用いた最大応答値の解析精度は若干悪くなる。
- 6) 海洋構造物の固有周期の数千倍程度の継続時間に対して波力荷重を設定する場合には、応答非超過確率3%及び限界値 $\gamma=3.5$ を用いて波力荷重を評価する

必要がある。

- 7) 本解析の範囲では、断面変更前の波力荷重を用いて断面変更後の最大応答値解析を行っても解析精度は低下しないので、断面変更後に波力荷重を再計算する必要はないと考えられる。
- 8) (60)式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推定できるので、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。

参考文献

- 1) Morison, J. R., O'Brien, M. P., Johnson, J. W., Schaaf, S.A., "The Force Exerted by Surface Waves on Piles", Petroleum Transactions, A.I.M.E., Vol. 189, 1950.
- 2) Goda, Y., "Wave forces on a vertical circular cylinder: Experiments and proposed method of wave force computation", Port and Harbour Technical Research Institute, Ministry of Transportation, August, 1964.
- 3) Malhotra, A. K., and Penzien, J., "Non deterministic analysis of offshore structures", Proc., ASCE, J. Eng. Mech. Div., 96, EM6, pp. 997-1000, 1970.
- 4) Cartwright, D. E. and M. S. Longuet-Higgins, "Statistical Distribution on the Maxima of a Random Function", Proceeding Royal Society of London, Series A, Vol. 237, pp. 212-232, 1956.
- 5) E. H. Vanmarcke, "On the distribution of the first-passage time for normal stationary random process", Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol. 42, pp.215-220, 1975.
- 6) Davenport A.G., "Note on the Distribution of the Largest Value of Random Function with Application to Gust Loading", Proceedings Institute Civil Engineering, Paper No. 6739, 1964.
- 7) 海洋鋼構造物設計指針(案)解説,土木学会海洋構造物に関する調査研究委員会,土木学会,昭和48年8月.
- 8) 河野健二,山田善一,K.Venkataramana,飯田毅,"波力を受ける海洋構造物の動的相互作用解析",構造工学論文集,Vol.37A, pp. 1489-1496, 1991.
- 9) Bretschneider C.L., "Sea motion and wave forecasting", Handbook of Ocean and Underwater Engineering, McGraw-Hill, 1969.
- 10) 合田良実,"波浪の統計的性質とその応用,水工学シリーズ No.11,Bコース,土木学会水理委員会, pp. B-1-1-B-1-29, 1975.
- 11) Zienkiewicz, O. C., etc., "Numerical Methods in Offshore Engineering", pp. 55-58, 250-252, John Wiley & Sons, Ltd., 1978.
- 12) Malhotra, A. K., and Penzien, J., "Response of Offshore Structures to Random Wave Forces", Proc., ASCE, J. Struc. Div., 96, ST10, pp. 2157, 1970.
- 13) Borgman, L. E., "Random hydrodynamic forces on objects", Ann. Math. Statistics, 38, pp37-51, 1967.
- 14) 土木学会編:水理公式集、土木学会、pp524-525,1985.
- 15) Malhotra, A. K., and Penzien, J., "Response of Offshore Structures to Random Wave Forces", Proc., ASCE, J. Struc. Div., 96, ST10, pp. 2157, 1970.

(1997年9月26日受付)