

大型の浮力部材を有する海洋構造物の動的応答解析

DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS OF OFFSHORE STRUCTURE WITH LARGE MEMBERS OF BUOYANCY TYPE

河野健二*, 小正高浩**, 宮崎義昭***

Kenji KAWANO, Takahiro KOMASA and Yoshiaki MIYAZAKI

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

** 新構造技術株式会社 南九州事務所 (〒890 鹿児島県 鹿児島市 上之園町18-10)

*** 宮崎県 土木部 北部港湾事務所

The offshore structures with large deck area is expected to have the possibility to enhance the utilization of the structure. The very great reaction force at foundation may be caused by the weight of the superstructure. If the reaction force can be reduced using large-diameter cellular members of buoyancy type, it provides very efficient contributions to develop the large offshore structure. In this study, the dynamic response analysis of the offshore structure with different diameter cellular members subjected to wave force is examined. The uncertain parameter effects on the dynamic responses for the wave force and soil-foundation system are evaluated with a perturbation method and the dynamic characteristics of the structure are examined with the reliability index.

key word : offshore structure, buoyancy member, soil-foundation system

1. はじめに

国土の狭い我が国においては、飛行場やごみ処理場、レジャー施設などは沿岸海上部に建造されることが考えられる。本論文では、これらの施設を設ける海域の水深を50m程度と想定した海洋構造物を取り扱う。海洋構造物の形式としてはジャケット型や浮体型などが考えられる。ここではジャケット型の一変種として、基礎地盤に作用する重量を軽減するため、浮力を利用した大断面の部材を有する海洋構造物を採り上げ、これをモデル化し波力に対する動的応答解析を行う。波力は海洋構造物の受ける主要な動的外力であるが、非再現性の不規則なものであり、解析にはエネルギー分布を周波数領域で表したパワースペクトル密度関数を用いたスペクトル応答解析が適用される^{1) 2) 3)}。本研究では、波力は水粒子と構造物系の相対速度と相対加速度の関数で表される修正モリソン式を用い、図-1に示すように海面運動を外洋で発達した風波の特性を持つブレットシュナイダー型のパワースペクトル密度関数で表すことにする。

解析では、まず上部構造を有限要素法を用いて表し、基部で固定された状態の固有値解析を行い低次モードのみを選出して自由度を縮小し、動的サブストラクチャー法を用いて一体化して地盤-基礎系の動的相互作用を考慮したものとなっている³⁾。

図-2に示す解析モデルの構造物系の動的特性を明らかに

にするため、初めに浮力部材の径を変化させたときの海洋構造物の動的特性がどのように変化するか数値解析を行った。また、波力を求めるパラメータである質量係数、抗力係数、平均波高や地盤のせん断波速度の変動性が解析モデルの動的応答に及ぼす影響についても検討を加えた。これらの応答量を用いて浮力部材を有する海洋構造物の任意レベルの応答限界値に対する信頼性評価を試みた。

今回の解析結果から基礎地盤に作用する上部構造物の重量が軽減されることに加え、浮力部材の径を大きくすることによって構造物の変位応答も軽減できることが分かった。浮力を利用した部材を有する海洋構造物は大きな海上空間を有する構造物に適用できるものと思われる。

2. 動的応答解析法

2.1 運動方程式

解析モデルは図-2に示すように比較的平面的広がりを持ち、浮力部材を下層に有するジャケット型の海洋構造物をモデル化し動的応答解析を行う。ここで扱う浮力部材の径は、静的解析に基づき基礎に大きな引抜き力が作用しないよう主要鉛直部材の径の1.5倍から3倍としている。波力はモリソン式に基づいて算定し、全体の定式化を行う。モリソン式は慣性力項と抗力項で表される。

$$F = F_I + F_D = C_M \rho V \dot{v} + 1/2 C_D \rho A v |v| \quad (1)$$

ここに、 C_M, C_D ；慣性係数及び抗力係数

ρ ；海水の密度

V, A ；部材の体積及び流れ方向の投影面積

$v, \dot{v}$ ；水粒子の速度及び加速度

水粒子の運動は、海表面の変動 η から求めるが、これはブレットシュナイダー型のスペクトルを使って以下のよう

$$S_{\eta\eta}(\omega_j) = \frac{4210}{\omega_j^5} \left(\frac{H}{T} \right)^2 \exp \left[-1052 \left(\frac{1}{\omega_j T} \right)^4 \right] \quad (2)$$

ここに、 T, H ；波の平均周期及び平均波高

また、浮力部材に作用する浮力は、静的な力として扱っている。

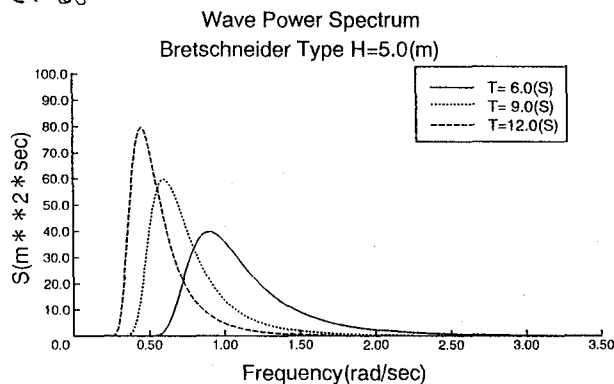


図-1 Bretschneider型のスペクトル

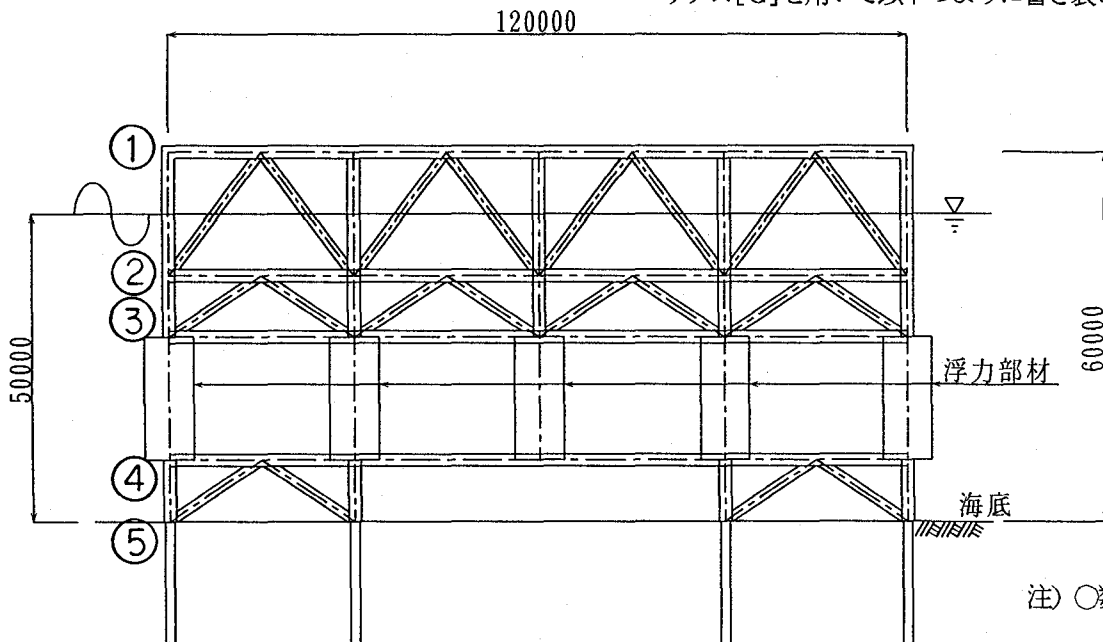


図-2 浮力部材を有する海洋構造物

上部構造を有限要素法を用いて表し、基礎-地盤系の動的特性をインピーダンス関数を用いて表す。全体系の運動方程式は、上部構造は動的外力（波力）と基礎-地盤系との接合点からの反力を受け、基礎-地盤系に作用する力は上部構造からの反力を取り、この連立方程式を解く動的サブストラクチャー法で表される。このとき上部工の質量、減衰および剛性マトリクスをそれぞれ $[M]$ 、

$[C]$ 、 $[K]$ 、構造物の変位を x とすると上部構造のみの運動方程式は以下のように書き表される。

$$[M] + [K_m] \{ \ddot{x} \} + [C] + [K_D] \{ \dot{x} \} + [K] \{ x \} = [K_m] \{ \ddot{v} \} + [K_D] \{ \dot{v} \} \quad (3)$$

ここに、 $[K_m] = [\rho (C_M - 1) V]$

$$[K_D] = \left[\sqrt{\frac{8}{\pi}} \rho C_D \frac{A}{2} \sigma_r \right]$$

$$[K] = [\rho C_M V]$$

σ_r ；水粒子と構造物間の相対速度

$$r = v - \dot{x}$$

また、動的外力である波力は微小振幅波理論により修正モリソン式を用いて求めている。

波力の中、抗力は水粒子の速度 v と構造物の速度 $\dot{x}$ との相対速度に比例するため非線形となるが、ガウス分布に従うものと仮定し、等価線形化手法により運動方程式の線形化を図っている^{4) 5)}。一般に構造物の動的挙動は比較的小数の低次の振動モード $\{q\}$ を用いて近似されることが知られており、基礎-地盤系の動的相互作用を考慮する場合これを適用することとした。

低次の振動モードのみで表した上部構造の変位 $\{x_s\}$ はモーダルマトリクス $[\Phi]$ を使って以下のように書き表される。

$$\{x_s\} = [\Phi]^T \{q\} \quad (4)$$

また、上部構造と基礎構造物の接点変位 $\{x_b\}$ は変換マトリクス $[G]$ を用いて以下のように書き表される。

$$\{x_b\} = [G] \{x_p\} \quad (5)$$

ここで $\{x_p\}$ は基礎構造物重心位置での変位であり

$$[G] = \begin{bmatrix} 1 & Z_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \{x_p\} = \begin{Bmatrix} x_g \\ \theta_g \end{Bmatrix}$$

Z_c は杭重心の深さ、 x_g, θ_g はそれぞれ杭重心での水平変位および回転変位を表す。

全体系の運動方程式は、上部構造物からの相互作用力を受けるとき基礎構造物に関する運動方程式を求める。

ここでサブストラクチャ法を適用すると、運動方程式は以下のように書き表される。

$$\begin{bmatrix} [I] & [\tilde{M}_{ap}] \\ [\tilde{M}_{pa}] & [\tilde{M}_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\mathbf{x}}_p \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [2\beta_1 \omega_1] & [0] \\ [0] & [C_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \dot{\mathbf{x}}_p \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [2\omega_1^2] & [0] \\ [0] & [K_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{x}_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{Pa\} \\ \{Pb\} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ただし、

$$\begin{Bmatrix} \{Pa\} \\ \{Pb\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [\Phi]^T [K_m] & [\Phi]^T [K_D] \\ [G]^T [L]^T [K_m] & [G]^T [L]^T [K_D] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{\mathbf{v}}_a\} \\ \{\mathbf{v}_a\} \end{Bmatrix}$$

$$[\tilde{M}] = [M] + [K_m]$$

$$[L] = -[K_{aa}]^{-1} [K_{ab}]$$

上部構造-基礎地盤系に対する運動方程式(式(6))に再び固有値解析を適用することによってモード毎の運動として単純化される。

$$\{\mathbf{s}\} = \begin{Bmatrix} \{\mathbf{q}\} \\ \{\mathbf{x}_p\} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

上部工-基礎地盤系の応答量 $\{\mathbf{s}\}$ は、モーダルマトリクス $[\Psi]$ と一般化座標 $\{\mathbf{y}\}$ を使って以下のように書き表される。

$$\{\mathbf{s}\} = [\Psi] \{\mathbf{y}\} \quad (8)$$

これを式(6)に代入し左から $[\Psi]$ の転置行列を乗じ、整理すると

$$\{\ddot{\mathbf{y}}\} + [2\beta_1 \tilde{\omega}_1] \{\dot{\mathbf{y}}\} + [\tilde{\omega}_1^2] \{\mathbf{y}\} = [\Psi]^T [F] \{\mathbf{Z}\} \quad (9)$$

上式をフーリエ変換すると次式が得られる。

$$\{\bar{\mathbf{y}}\} = [H] [\Psi]^T [F] \{\bar{\mathbf{Z}}\} = [R] \{\bar{\mathbf{Z}}\} \quad (10)$$

ここに

$$[H] = [-\omega^2 [I] + i\omega [2\beta_1 \tilde{\omega}_1] + [\tilde{\omega}_1^2]]^{-1} \quad (11)$$

これにより変位が求められれば、部材に発生する断面力 $\{\mathbf{S}\}$ は剛性マトリクスを使って求められる。

$$\{\mathbf{S}\} = [K] \{\mathbf{x};\} \quad (12)$$

2.2 不規則応答解析

外力としての波力はモリソン式により算定するが、不規則特性を有するものであり周波数領域で取り扱うこととする。微小振幅波理論によれば水粒子速度 $\mathbf{v}$ は海表面変動 η を使って

$$\mathbf{v}(t) = \eta(t) \omega \frac{\cosh[k(h+y)]}{\sinh(kh)} \quad (13)$$

ただし、 k :波数

h :水深

y :鉛直距離

η をパワースペクトル密度関数で表すと、水粒子速度のパワースペクトル $S_{vv}(\omega)$ は次式で表される。

$$S_{vv}(\omega) = \omega^2 \frac{\cosh^2[k(h+y)]}{\sinh^2(kh)} S_{\eta\eta}(\omega) \quad (14)$$

上式に式(3)から式(11)の関係を使って波力のパワースペクトル $S_{FF}(\omega)$ は次のように表される。

$$[S_{FF}(\omega)] = [\Psi]^T \begin{Bmatrix} \{Pa\} \\ \{Pb\} \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} S_{vv}(\omega) & S_{vv}(\omega) \\ S_{vv}(\omega) & S_{vv}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{Pa\} \\ \{Pb\} \end{Bmatrix} [\Psi] \quad (15)$$

よって、上部工-基礎地盤系の一般化座標による応答のパワースペクトル $S_{yy}(\omega)$ は周波数応答関数 $[H(\omega)]$ を使って

$$[S_{yy}(\omega)] = [H(\omega)] [S_{FF}(\omega)] [H(\omega)]^* \quad (16)$$

と書き表される。ただし、 $[H(\omega)]^*$ は $[H(\omega)]$ の共役複素数である。さらに $[\Psi]$ を用いて一般化座標における共分散応答マトリクスは次のように変換される。

$$E[\{\mathbf{s}\} \{\mathbf{s}\}^T] = \int_{-\infty}^{\infty} [\Psi] [S_{yy}(\omega)] [\Psi]^T d\omega \quad (17)$$

最終的にモーダルマトリクス $[\Phi]$ を用いて上部工の変位の共分散応答マトリクスは以下のように求まる。

$$E[\{\mathbf{x}_s\} \{\mathbf{x}_s\}^T] = [\Phi]^T E[\{\mathbf{s}\} \{\mathbf{s}\}^T] [\Phi] \quad (18)$$

共分散応答マトリクスの対角項の平方根をとったものがrms応答として得られる。さらに、断面力の共分散マトリクスは、変位の共分散マトリクスと剛性マトリクスを使って以下のように求められる。

$$E[\{\mathbf{s}\} \{\mathbf{s}\}^T] = [K]^T E[\{\mathbf{x}_s\} \{\mathbf{x}_s\}^T] [K] \quad (19)$$

2.3 不確定量を考慮した運動方程式

構造解析に伴う不確定量としては作用外力、使用材料の物性などが考えられる。ここでは作用外力は修正モリソン式による波力を想定しており、質量係数や抗力係数をパラメータとして含んでいる。

一般にこれらの係数は変動性を有しているが、これらの係数の平均値のまわりに分布する確率量ととらえ、摂動法を適用すると運動方程式の各係数マトリクスは以下のように書き表される。⁶⁾

$$\begin{aligned} [K_m] &= [K_m^{(0)}] + \varepsilon_1 [K_m^{(1)}] \\ [K_D] &= [K_D^{(0)}] + \varepsilon_2 [K_D^{(1)}] \\ [K_m] &= [K_m^{(0)}] + \varepsilon_1 [K_m^{(1)}] \end{aligned} \quad (20)$$

ここで ε_1 , ε_2 は質量係数および抗力係数の平均値回りに分布する確率量とする。

同様にパワースペクトル密度を平均波高に着目した形で表し、地盤の物性の代表値として地盤のせん断波速度を変動量と考え、平均値回りに分布する確率量として考える。

以上に与えた質量係数、抗力係数、平均波高およびせん断波速度の変動を確率量として考えると運動方程式もこれらにより確率量として表される。このとき一般化座標は以下のように書き直される。

$$\begin{aligned} \{\mathbf{s}\} &= \begin{Bmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{x}_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{q}^{(0)} \\ \mathbf{x}_p^{(0)} \end{Bmatrix} + \sum_{i=1}^m \varepsilon_i \begin{Bmatrix} \mathbf{q}^{(1)} \\ \mathbf{x}_p^{(1)} \end{Bmatrix} \\ &= \{\mathbf{s}_0\} + \sum_{i=1}^4 \varepsilon_i \{\mathbf{s}_i\} \end{aligned} \quad (21)$$

ただし、

$$\{s_i\} = \begin{Bmatrix} q^{(i)} \\ x_p^{(i)} \end{Bmatrix}$$

水粒子の速度および加速度も同様に取り扱い、 ε_i の2次以上の項を無視すると各パラメータに関する運動方程式は次のように求めることができる。

$$\begin{aligned} [A_0] \{s_0\} + [B_0] \{s_0\} + [D_0] \{s_0\} &= [F_0] \{Z_0\} \\ [A_0] \{s_1\} + [B_0] \{s_1\} + [D_0] \{s_1\} &= -[A_1] \{s_0\} + [F_1] \{Z_0\} \\ [A_0] \{s_2\} + [B_0] \{s_2\} + [D_0] \{s_2\} &= -[B_2] \{s_0\} + [F_2] \{Z_0\} \\ [A_0] \{s_3\} + [B_0] \{s_3\} + [D_0] \{s_3\} &= [F_0] \{Z_1\} \\ [A_0] \{s_4\} + [B_0] \{s_4\} + [D_0] \{s_4\} &= -[B_1] \{s_0\} - [D_1] \{s_0\} \end{aligned} \quad (22)$$

式(22)の第1式は、各項とも平均値となる場合の運動方程式である。以下、質量係数、抗力係数、入力波の平均波高および地盤のせん断波速度の変動量に関する運動方程式である。各運動方程式の左辺の係数マトリクスは、すべて平均値に関するマトリクスで表される。これらの方程式は平均値に関する第1式の応答が得られると、順次他の量に関する応答が求められる。従って、波力のパワースペクトル密度関数が与えられると、一般化座標に関する応答のパワースペクトルが求められる。すなわち

$$\begin{aligned} [S(\omega)] &= [R_1][S_{z_0 z_0}(\omega)][R_1] \\ [S_{ij}(\omega)] &= [\Psi][S_{\bar{y}_1 \bar{y}_1}(\omega)][\Psi]^T \quad (23) \\ [R_1] &= -\omega^2 [H_0][\Psi]^T [A_1][\Psi][R_0] + [H_0][\Psi]^T [F_1] \\ [R_2] &= -i\omega [H_0][\Psi]^T [B_2][\Psi][R_0] + [H_0][\Psi]^T [F_2] \\ [R_3] &= [R_0] = [H_0][\Psi]^T [F_0] \\ [R_4] &= -i\omega [H_0][\Psi]^T [B_1][\Psi][R_0] + [H_0][\Psi]^T [D_1] \\ i &= 1, 2, 3, 4 \quad j = 1, 2, 3, 4 \end{aligned}$$

ここで $[S_{z_0 z_0}(\omega)]$ は、波力のパワースペクトル密度関数から求められる。一般化座標における共分散応答は

$$[R_{ss}] = \int_{-\infty}^{\infty} [S_{ij}(\omega)] d\omega \quad (24)$$

と表される。

2.4 信頼性評価

構造物を設計するにはその安全性を確保するため応力度や変形量に許容値を設定する。このような許容値をどのように設定すればよいのかということは、構造特性や荷重特性などによって検討する必要がある。本解析では、はじめに最大の変位が生じるデッキでの水平方向の変位応答に対する任意レベルの限界値に対する応答超過に及ぼす各種パラメータの変動の影響について調べる。

初期値0の不規則過程 $x(t)$ が微小時間 dt の間に $x=\lambda$ を超過する確率は、ポアソン過程に従うものとして扱うことによって求められる。 $x(t)$ の応答が継続時間 T に関し

$$P_s(\lambda) = \exp\left\{-2 \int_0^T \frac{1}{\pi} \frac{\sigma_{x'}}{\sigma_x} \exp\left(-\frac{\lambda^2}{2\sigma_{x'}^2}\right) dt\right\} \quad (25)$$

と与えられる。ここで $\sigma_{x'}$ 、 σ_x は、それぞれ変位および速度に関する二乗和平均(rms)応答である。さらに応答スペクトルの形状特性を考慮すると、応答が任意のレベルの限界値を超過しない確率を補正係数 C_1 を含んだ形で表記すると以下の通りである⁷⁾。

$$L(\gamma) = \exp\left\{-\frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_0}} t_0 \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2}\right) C_1\right\} \quad (26)$$

ただし

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

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

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

ここに t_0 は波力の継続時間であり、 γ は応答の限界値とrms応答との比を表している。また、 $G_x(\omega)$ は x に関するパワースペクトルである。

ここでrms応答 σ_x 、 $\sigma_{x'}$ は前述したような各種パラメータの変動量を含んだ形で表される。そこでこのようなパラメータの影響が応答の任意レベルの限界値を超える場合を式(26)を用いて求めることにする。さらに、構造物の信頼性解析をより正確に行うためにはどのような破損が生じるかを知る必要がある。本解析では、線形範囲での応答を扱っており、任意点の応力がある限界値を超過する確率を信頼性指標を用いて表すことにする。特に浮力部材を設けることによって、浮力部材は大きな波力を受ける。このため浮力部材に近接する部材では過大な応力が発生することが予想される。そこで本解析では、このような部材に波力によって発生する応力が部材強度を超過する可能性について検討する。

構造解析において、静的解析と動的解析は独立に行えるものと仮定すると応力状態の半断は次式にて行う。

$$\sigma_0 + k\sigma_d \leq S \quad \sigma_s = \bar{R} \quad (27)$$

$$\sigma_s = \sqrt{\text{var}(\sigma_0) + \text{var}(k\sigma_d)} \quad \sigma_R = S_R \bar{R}$$

$$S_R = 0.1 \text{ (変動係数)}$$

σ_0 ; 静的解析による応力

σ_d ; 動的解析による応力

σ_s ; 許容応力

k ; パラメータ

部材強度の変動係数は0.1と仮定している。動的外力による応力は $k\sigma_d$ で表されるが、 k はピーク係数に相当する。応答 $x(t)$ がガウス過程の場合、継続時間 T におけるピーク係数は

$$k = \sqrt{2 \log(\nu T)} + \sqrt{2 \log(\nu T)} \quad (28)$$

ただし

$$\nu = \frac{1}{\pi} \frac{\sigma_{x'}}{\sigma_x}$$

で与えられる。微小振幅波理論を用いると、波力に対する海洋構造物の応答は、ガウス過程となるので近似的に式(21)が適用できるものと考えられる。これより信頼性指標 β は次式で表される。

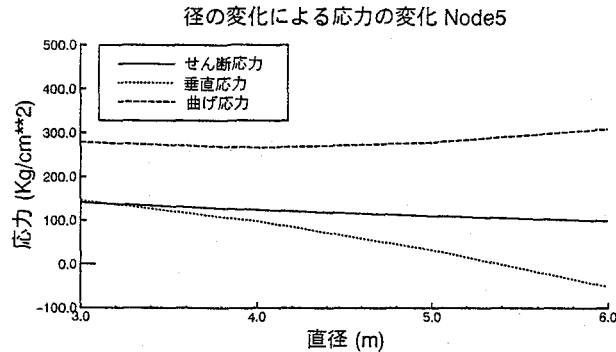
$$\beta = \frac{\overline{R} - \overline{S}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \tag{29}$$

ただし、 $\overline{R}$ は強度の平均値、 $\overline{S}$ は荷重の平均値、 σ_R 、 σ_S はそれぞれ強度及び荷重の分散を表す。 $\overline{R}$ 、 σ_R を時間に依存しない応力の平均値及びその標準偏差とすれば一定値となる。一方、 $\overline{S}$ 、 σ_S は外力によって生じるため、時間の関数となる。従って、 $k\sigma_a$ すなわちrms応答から得られる最大値の期待値およびその標準偏差 σ_s は時間の関数であり、信頼性指標は時間の関数となる。信頼性指標は、平均値と標準偏差を用いて信頼性に関する評価を行うものであり、任意断面の応力に対して適用することにより構造物全体の信頼性を求めることができる。

3. 解析結果

3.1 不規則応答解析結果

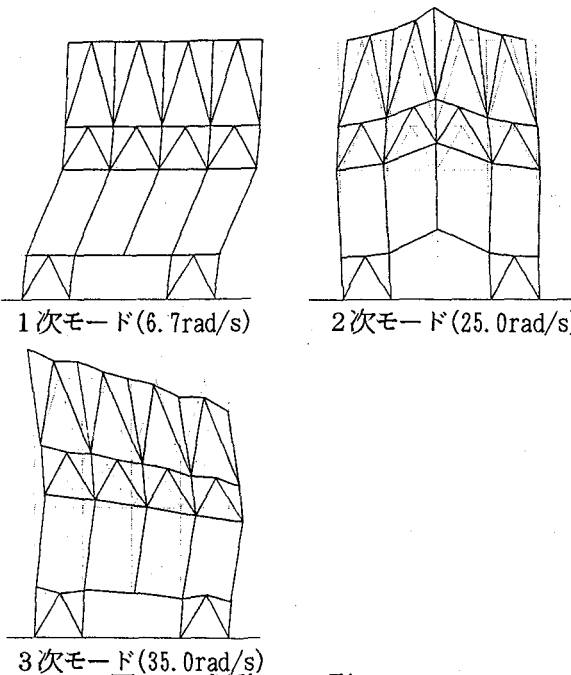
図－3は解析モデルに対して浮力の影響を考慮して静的解析を行ったものである。このとき、主要な鉛直部材及びデッキ部材の直径を2.5m、肉厚25mm、水平部材及び斜部材の直径を2.0m、肉厚を20mm、浮力部材の直径を3.0～6.0m肉厚を25mmとしている。



図－3 節点5における応力度（静的解析）
横軸は浮力部材の直径の変化を3mから6mまでとり、縦軸には節点5（柱基部）の応力をとったものである。浮力部材の径の増加に伴い、曲げ応力は若干増加しているものの垂直応力およびせん断応力は減少している。柱基部の応力が軽減されていることから、基礎の支持力も軽減されていると考えられる。浮力部材による基礎工への反力の軽減は有効であると考えられるが、浮力部材の大きさや形状、設置個所についてはさらに検討の余地があると考ええる。

次に不規則振動論にもとづき動的応答解析を行うが、浮力部材の径を6mとしたときの固有値解析の結果、各振動モードに対する固有値は1次モードで6.7rad/s、2次モードで25.0rad/s、3次モードで35.0rad/sとなった。ブレットシュナイダー型のパワースペクトルではエネルギーは2rad/s以下に集中しており、2次以上の振動モー

ドの影響はごく小さいものと考えられる。
図－4は各振動モード形を示したものであるが1次モードは水平方向非対称形、2次モードは鉛直方向対象形、3次モードは鉛直方向非対称形となっている。



図－4 振動モード形

表－1には、浮力部材の径を変化させることによって流体力による減衰定数の値がどのように変化するかを各振動モード毎に示した。1次モードは浮力部材の径3mで約4％から6mで約3％まで低下している。2次モードではほとんど変化がなく1％以下である。また3次より高次のモードでは減衰定数は0.5％以下と小さい。

mode	浮力部材の直径 (m)			
	3	4	5	6
1st	3.74	3.29	3.11	3.03
2nd	0.86	0.84	0.84	0.84
3rd	0.22	0.19	0.18	0.18
4th	0.33	0.31	0.29	0.26
5th	0.21	0.20	0.03	0.02

表－1 流体力による減衰定数

波力に対する外側にある垂直部材のrms応答変位を、浮力部材径を変化させた場合に対して解析を行った結果を図－5から図－7に示す。

図－5は入力波の平均波高5m、平均周期9秒としたときの変位である。全体の変形形状は、上下端の回転を拘束した場合の柱の変形形状と類似している。浮力部材を設けた節点3から節点4での変形が大きく現れているようであるが、この層には斜部材を配置していないためであると考えられる。浮力部材の径Dを3mとしたとき、節点1の変位は0.0092mである。Dを4mとしたとき、節点1の変位は0.0073mでD＝3mのときの約80％に低減されている。D＝5mとすると変位は0.0068mとなり、D＝3mのときの約75％にまで低減されている。さらに

D = 6 m とすると 4 m のときとほぼ同じ値となり、浮力部材径が 5 m を越すと変位応答は増加する傾向にある。

波の平均周期は前と同じように 9 秒に固定し、平均波高を 7 m とした場合の結果が図-6 である。浮力部材の径 $D = 3$ m のとき、節点 1 での変位応答は 0.015 m となっている。D = 4 m としたときの変位は 0.0117 m となり、D = 3 m のときの約 80 % に低減される。D = 5 m のときの変位は 0.0111 m で D = 3 m の約 75 % に低減される。D = 6 m のときには変位は 0.0113 m となり、D = 5 m のときと比べて若干大きくなっているが平均波高 5 m のときと比較するとその増加率は小さい。

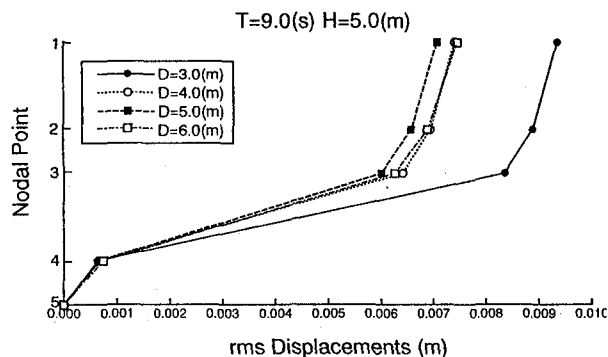


図-5 rms 変位応答 (平均波高 5 m)

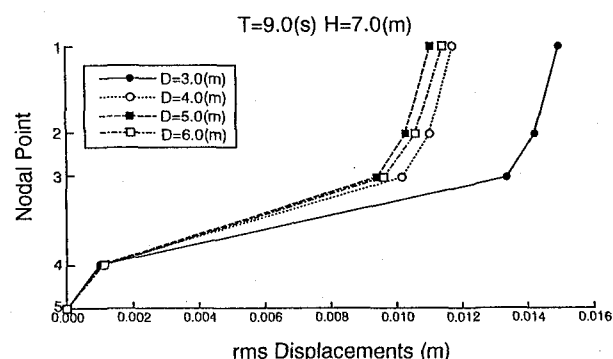


図-6 rms 変位応答 (平均波高 7 m)

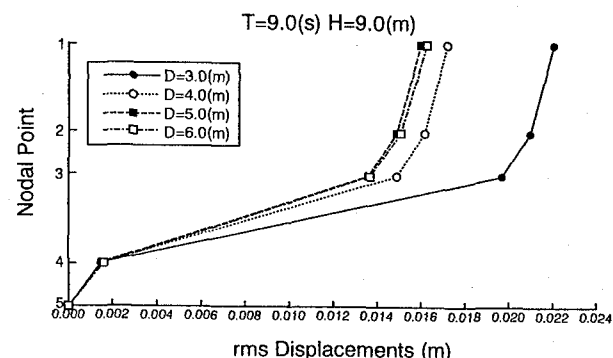


図-7 rms 変位応答 (平均波高 9 m)

図-7 は、スペクトルを設定する入力波の平均波高 9 m、平均周期 9 s としたものである。節点 1 での変位は浮力部材径 $D = 3$ m の場合は 0.022 m となっているが、径 4 m では 0.017 m と約 30 % 低下している。径が 5, 6 m の場合には、変位応答はほとんど差がなく 0.016 m で浮力部材径 4 m の場合の約 10 % 低減されている。

今回採り上げた解析モデルにおいては、浮力部材径が 3 m から 4 m に変化するときには応答の低減率は大きく、5, 6 m のときは応答の低減率は小さい。このことから浮力部材の径は 5 m 前後とするのが合理的であると考えられる。

次に、同じ状態での外側にある垂直部材に生じる rms 曲げ応力の分布状態を図-8 から図-10 に示す。全体的な曲げ応力の分布状況は、ラーメン構造第 2 層に浮力部材を配置しており剛性が急変すること、斜部材を配置していないことからこの周辺での変形が大きく、応力も大きくなっている。

図-8 は、平均波高 5 m、平均周期 9 秒に対する解析結果である。D = 3 m の場合には浮力部材での曲げ応力が大きく 165 kgf/cm^2 となり、これに接合された部材での応力は 130 kgf/cm^2 小くなっている (第 1 層上部及び第 3 層下部)。これに対して径 D を大きくすると、曲げモーメントはあまり変動ないが、曲げ剛性が高くなり応力

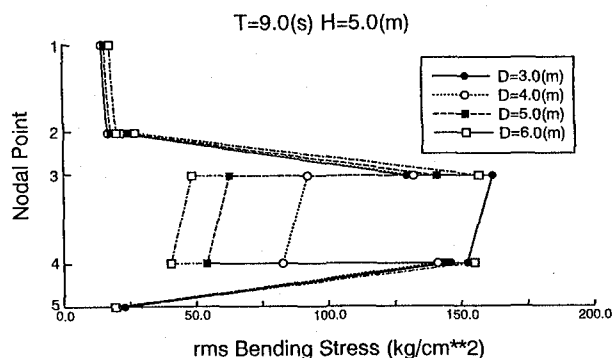


図-8 rms 曲げ応力 (平均波高 5 m)

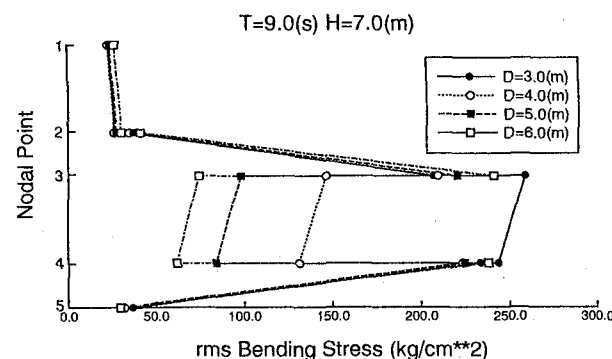


図-9 rms 曲げ応力 (平均波高 7 m)

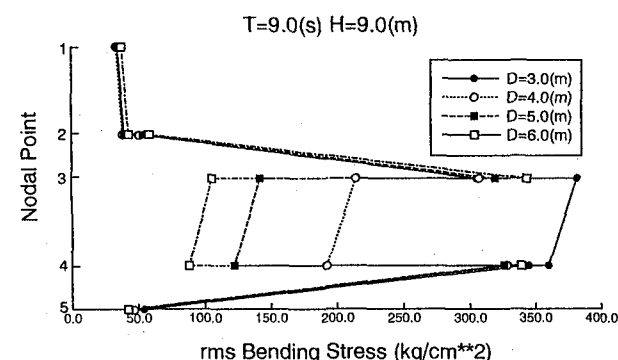


図-10 rms 曲げ応力 (平均波高 9 m)

は小さくなるようである ($D=4\text{ m}$ で 85Kgf/cm^2 , $D=5\text{ m}$ で 60Kgf/cm^2)。一方、浮力部材の取り付け部は D が大きくなると一般部との剛性の差が大きくなり、応力も大きくなっている。ラーメン3層目部材の付け根では、 $D=5\text{ m}$ に対して 140Kgf/cm^2 , $D=6\text{ m}$ に対して 155Kgf/cm^2 と増加する。ラーメン4層目部材では D の変化に対してあまり影響がなく、 30Kgf/cm^2 前後となっている。

平均周期は9秒に固定し、平均波高を7m, 9mとしたときの浮力部材径 D の変化に対するrms曲げ応力の変化をプロットしたものが図-9及び図-10である。発生応力は波高が高くなるほど大きくなる傾向にあるが、分布形状は平均波高5mの場合と同じとなっている。

3.2 不確定量を考慮した解析結果

一方、質量係数、抗力係数、波高、地盤のせん断波速度の不確定性を考慮した場合の数値解析結果を図-11及び図-12に示す。

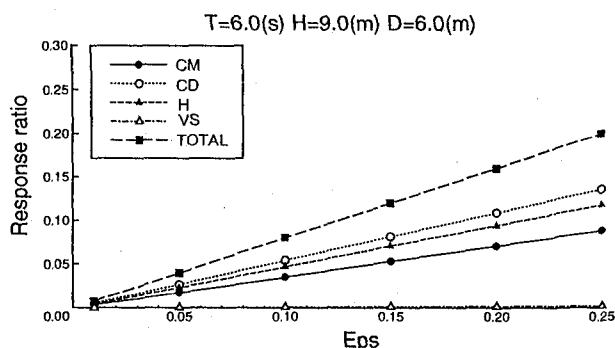


図-11 応答に及ぼす
不確定量の影響 (平均周期6秒)

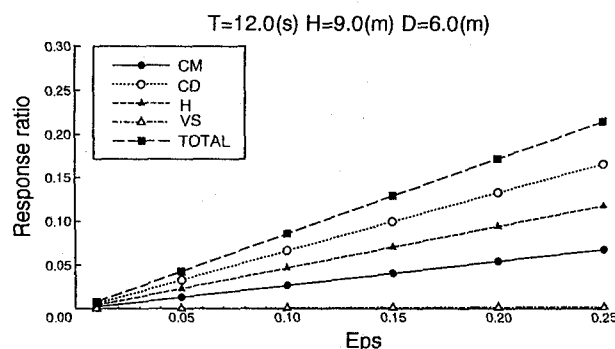


図-12 応答に及ぼす
不確定量の影響 (平均周期12秒)

浮力部材の径を6m, 入力平均波高を9m, 入力波の平均周期を6秒とした場合の結果である。各パラメータの変動量を横軸にとり、それぞれの変動量に対する応答と、それがない場合のrms応答比を縦軸に示している。どのパラメータを不確定量にとっても不確定性が大きくなるに従い、応答も直線的に増大する。変動係数を25%とした場合、全応答では約20%の変動を示している。

各パラメータの不確定性の要因毎の応答に寄与する割合はそれぞれ異なり、以下の通りである。

せん断波速度の不確定性の影響はごく小さく、解析結果にほとんど影響がない。質量係数 C_M の変動係数を25%とした場合、応答に寄与する割合は約8%で比較的大きい値となっている。これに対して抗力係数 C_D の不確定性の影響は約13%とさらに大きく、今回取り上げた要因の中で影響がもっとも大きくなっている。平均波高の不確定性の影響は、平均波高の変動係数が25%に対して応答に対する寄与率は約12%と大きい値となっている。

図-12は浮力部材の径、入力の平均波高は固定し、入力波の平均周期を12秒とした場合の結果である。変動係数を25%とした場合、全応答では約22%の変動パラメータの影響が示されている。またこの場合も、せん断波速度の不確定性の影響はごく小さく、解析結果にほとんど影響がない。質量係数 C_M の変動係数を25%とした場合、応答に寄与する割合は約7%で平均周期6秒に比べやや小さい値となっている。これに対して抗力係数 C_D の不確定性の影響は、約17%で平均周期6秒の場合に比べ大きくなっている。平均波高の不確定性の影響は大きい、平均周期が6秒の場合とほぼ等しく、平均波高の変動係数が25%に対して応答に対する寄与率は約12%を示している。

3.3 信頼性解析の結果

応答超過に対する信頼性評価を行うにあたり1次の固有周期の10000倍の継続時間を持つ波力により発生する最大応答を求めた。図-13には平均波高が5mで入射波の平均周期が6秒から12秒まで変化する場合のピーク係数を示した。波力の作用する時間が増加するに従ってピーク係数は漸増し、10000秒で約3.0となる。

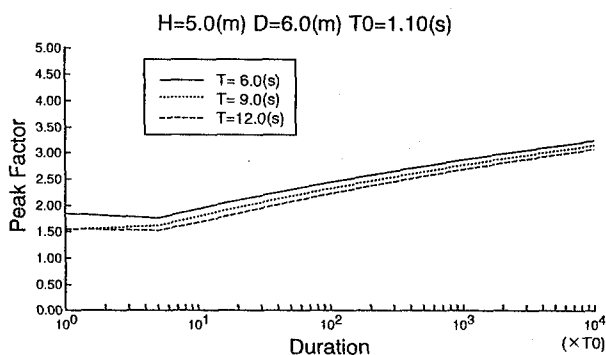


図-13 ピーク係数

不確定量の変動量を30%に設定した場合の信頼性解析を行った結果を図-14に示す。このとき入射波の平均周期9秒, 平均波高5m, 浮力部材の径6mとし、限界値は不確定量の変動を考慮しない場合のrms応答の3.5倍に設定している。図-14は片対数グラフとなっているが、100秒経過後には約80%, 1000秒後には約20%となっており信頼性は急激に低下することが分かる。これは限界値をrms応答の3.5倍としているためであり、長時間の波力の作用により十分応答超過があることが分かる。また、その分布は時間の経過に伴い徐々に減少しており、波力

の継続時間が1000秒を越えると約0.1以下の値を示している。これは波力による海洋構造物の応答が狭帯域的な性質を有しており、構造物の固有周期と入射波の卓越周

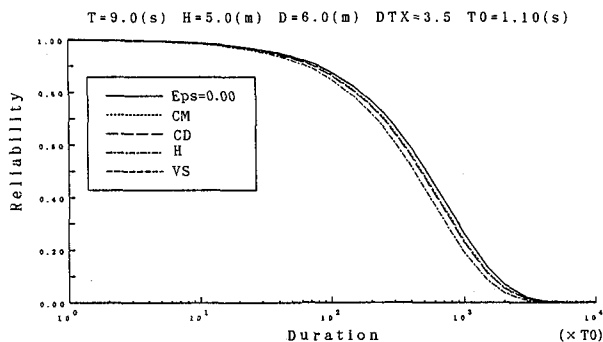


図-14 応答超過に対する信頼性

期に応答が支配されるためと考えられる。また不確定性を考慮した場合、平均波高の影響が大きく、質量係数、抗力係数の不確定性による影響は平均波高のその約1/3と小さい。地盤のせん断波速度の不確定性による影響は非常に小さく、ほとんど不確定性を考慮しない場合と同じ値となる。

図-15は、浮力部材と結合する部材端での曲げ応力の応答超過に対する信頼性指標を示したものである。入力波の条件は、平均周期9秒、平均波高を5mとしたものである。波力の作用時間が増加するに従って信頼性指標は低下し、許容値を超過する確率が高まることを示している。許容応力を1600Kg/cm²と仮定すると、信頼性指標 β は経過時間とともに3.8から2.5まで低下している。

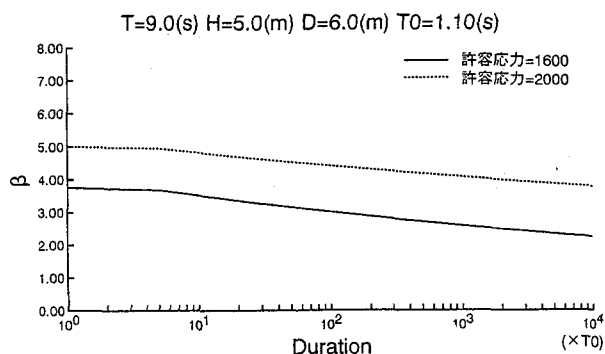


図-15 信頼性指標 (平均波高5m)

4. 結言

以上、大断面の浮力を利用した部材を有する海洋構造物の動的応答解析を不規則振動解析を用いて行い、浮力部材の径の変化が構造系に与える影響を評価した。また、変動性を有する各パラメータが応答評価に及ぼす影響について検討を加えた。本論文で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 大断面の浮力を利用した部材を有する海洋構造物は、基礎に作用する反力の軽減に有効である。浮力部材を海底付近に設置した場合、波力の影響は小さいが浮力部材の設置箇所によっては波力の影響が大きく

なることも考慮する必要がある。

- 2) 変位応答を最も低減できるような浮力部材の径が存在する。浮力部材では曲げ応力はその径を大きくすることによって低減できるが、隣接部材での応力が大きくなるため、斜め材を配置することにより、より合理的な設計が可能となると考えられる。
- 3) 構造物の応答に質量係数、抗力係数、平均波高および地盤のせん断波速度の変動性が及ぼす影響は、平均波高、質量係数、抗力係数で大きく、地盤のせん断波速度では小さいことが分かった。
- 4) 応答が限界値を超過する確率と信頼性指標により、海洋構造物の信頼性を評価することができる。しかし、これは波力の作用する時間や許容応力度の設定、不確定量の影響などに左右されるため、これらの影響を把握する必要がある。

なお、本論文では作用力として波力のみを取り扱っているが、今後地震力、潮流力なども取り扱っていく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 星谷 勝：確率論手法による振動解析，鹿島出版会
- 2) 小坪清真：土木振動学，森北出版
- 3) 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
- 4) A. K. Malhotra, J. Penzien: Nondeterministic Analysis of Offshore Structure, J. Engng. Mech. Division, ASCE, EM6, pp. 985-1003, 1970
- 5) E. Smith: Nonlinear Stochastic Analysis of Compliant Platforms, Offshore Technology Conference, OTC3801, pp. 69-76, 1980
- 6) E. H. Vanmarcke, On the distribution of the first-passage time for normal stationary random process, Jour. of Appl. Mech., ASME, Vol. 42(1975), pp215-220
- 7) K. Kawano, K. Venkataramana, Y. Yamada, H. Iemura: Dynamic response of offshore structures with uncertain parameters, Proc. of first Pacific/Asia Sym. I(1990), pp287-294
- 8) R. W. Clough, J. Penzien: Dynamics of Structures, McGraw-Hill inter. Eds., pp389-403, 1995

(1995年 9月18日受付)