

海洋構造物の動的応答解析に及ぼす制振の影響

ACTIVE CONTROL EFFECTS ON DYNAMIC RESPONSE
ANALYSIS OF OFFSHORE STRUCTURE河野健二*¹ 吉原 進**²

Kenji KAWANO and Susumu YOSHIHARA

In order to perform the reliable design of an offshore structure, it is necessary to evaluate the exact response to dynamic loads such as waves and earthquakes. If the dynamic response of the offshore structure can be reduced with some control forces, it is very helpful to enhance the safety of the structure. In this study, it is examined to apply the active control method to reduce the dynamic response of a simplified model of an offshore structure due to wave forces. Since the wave force is simulated in the time domain, the active control force can be determined with an instantaneous optimal control method. It is shown that the active control method is very effective on the reduction of the dynamic response in the dominating frequency region of wave forces, and it is important to clarify the relation between the dominating frequency of wave forces and the dynamic characteristics of the structure.

1. まえがき

海洋構造物の動的応答特性を明確にしておくことは、信頼性のある設計を行う上で重要なことである^{1),2)}。一般に動的応答は入力特性と構造物の振動特性に大きく依存している。主要な外力である波力に対する海洋構造物の動的応答に関しても入力特性と構造物の振動特性の把握が大切になる。水深が100m程度の海域にあるジャケット型の海洋構造物の固有周期は波力の卓越周期よりも短く、その動的応答は波力の卓越周期に基づくものが支配的になる。このような場合の制振を考える場合、構造物の固有振動数に注目したTMDのみを用いても十分な制振を行うことができない³⁾。そこで本研究では海洋構造物の制振に関してアクティブな制振力の影響について検討を加えることにする。波力は一般に不規則現象でありパワースペクトルを用いて表されるが、本研究では平均波高や平均周期をパラメータとするブレットシュナイダー型のパワースペクトルに対してシミュレーションにより時間領域での波を求めている。ここでは簡単なモデルの構造物に対して動的応答解析を行い、構造物の振動特性と入力特性に対するアクティブな制振の効果に対する基礎的な検討を加えた。

2. 解析モデルと運動方程式

海洋構造物の動的応答解析においては基礎構造物と上部構造物との動的相互作用による影響に加えて、構造物の固有振動数と波力の卓越振動数の関係を明確にしておくことが必要になる²⁾。水深が約100m程度の海域でのジャケット型の構造物を対象とすると、動的応答は1次振動モードが支配的となる。また制振の影響

¹* 鹿児島大学工学部海洋土木開発工学科 助教授²** 鹿児島大学工学部海洋土木開発工学科 教授

この論文の一部は「アクティブ制振(振)シンポジウム論文集」pp.151-158,1992年3月に発表している。

を調べる場合卓越応答に注目することにより、その特性の把握が容易になるものと思われる。そこで動的解析モデルとしてはTMDをデッキ上に有する2自由度系の構造物を扱うことにする⁴⁾。波力は微小振幅波理論により修正モリソン式を用いて表される。この波力の中で抗力は水粒子と構造物の相対速度の自乗に比例するため非線形となる。一般に波力は水粒子の加速度に比例する慣性力項とその速度と構造物との相対速度の自乗に比例する抗力項の和で表される。この抗力項の相対速度 $\dot{r}$ がガウス分布に従うものとする、等価線形化法を用いて運動方程式は線形化される¹⁾。構造物の動的応答において1次振動が支配的となるため構造物の応答は適当な形状関数 $\psi(y)$ を用いることによりデッキ上の水平方向の変位 x_1 を用いて表される。時間の関数である波力を $P_f(t)$ とすると、1自由度系で表された構造物のデッキ上にTMDを有し、アクティブな制振力 $u(t)$ を受ける全体系の運動方程式は

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 + C_2 & -C_2 \\ -C_2 & C_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_f(t) \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -1 \\ 1 \end{Bmatrix} u(t) \end{aligned} \quad (1)$$

ただし

$$\begin{aligned} M_1 &= h_0[M + (C_M - 1)\rho V] \\ C_1 &= (2\beta_1\omega_1 + \frac{\rho}{2}h_0C_D A \sqrt{\frac{8}{\pi}}\sigma_F)M_1 \\ K_1 &= \omega_1^2 M_1 = h_0 K \\ x &= \psi(y)x_1 = [1 - 3(\frac{y}{h})^2 - 2(\frac{y}{h})^3]x_1 \\ h_0 &= \int_{-h}^0 \psi(y)^2 dy = \frac{11}{7}h \end{aligned}$$

と表される。ここで添字1は主構造に対するものであり、添字2はTMDに対する諸量を表している。 M, C, K は単位長さ当たりの質量、減衰及び剛性である。また V, A は流れ方向の部材の体積及び断面積であり、 h は水深を表している。 C_M, C_D は質量係数と抗力係数であり本解析では2.0と1.0をそれぞれ用いている。波力 $P_f(t)$ は修正モリソン式を用いて表されるが、このためには任意の水深における水粒子の速度と加速度を求める必要がある。微小振幅波理論を用いると海面の運動が与えられ、これらの値を求めることができる。一般に海面の運動は不規則であり、いくつかのパワースペクトル密度関数による評価法が提案されている。本解析では平均波高 $\bar{H}$ 、平均周期 $\bar{T}$ をパラメータとするブレットシュナイダー型のパワースペクトル $S_{\eta\eta}(\omega)$ を用いてシュミレーションにより波力 $P_f(t)$ を求めることにする。すなわち、

$$P_f(t) = C_{M_0} \sum_{j=1}^n P_M(\omega_j) \sin(\omega_j t + \phi_j) + C_{A_0} \sum_{j=1}^n P_A(\omega_j) \cos(\omega_j t + \phi_j) \quad (2)$$

ただし

$$\begin{aligned} P_M(\omega_j) &= \omega^2 \sqrt{2S_{\eta\eta}(\omega_j) d\omega} \frac{F(k_j)}{\sinh(k_j h)} \\ P_A(\omega_j) &= \omega \sqrt{2S_{\eta\eta}(\omega_j) d\omega} \frac{F(k_j)}{\sinh(k_j h)} \\ F(k_j) &= \left(\frac{1}{k_j} - \frac{6}{k_j^3 h^2} \right) \sinh(k_j h) - \frac{12}{k_j^3 h^4} \cosh(k_j h) - \frac{12}{k_j^4 h^3} \\ S_{\eta\eta}(\omega_j) &= \frac{4210}{\omega_j^5} \left(\frac{\bar{H}}{\bar{T}^2} \right)^2 \exp \left[-1052 \left(\frac{1}{\omega_j \bar{T}} \right)^4 \right] \end{aligned}$$

ここで k_j は波数であり、 h は水深を表している。また ϕ_j は0から 2π の間に一様に分布する乱数である。波力が時間の関数として表されると全体系の運動方程式(1)は線形加速度法等を用いて解くことができる。

3. 制振力の評価法⁴⁾

制振を受ける海洋構造物はその振動特性に注目することにより簡単化され運動方程式は式(1)のように表される。この式は制振力 $u(t)$ を含むので、応答を求めるためには $u(t)$ を決める必要がある。本解析では固有値解析を用いて式(1)を振動モード毎に分け、Wilson の θ 法を用いて解くことにする。この方法は他の線形加速度法等に比べて安定性があり、各時刻の変位及び速度をそれ以前の応答を用いて表すのに適している。この場合の制振力は速度、変位及び制振力の自乗和からなる汎関数の最小化条件より各時間刻み毎に決めることができる。したがって、式(1)を各次の固有モード毎に分けて表すと、

$$\ddot{y}_j + C_j \dot{y}_j + \omega_j^2 y_j = f_j + B_j u(t) \quad (3)$$

となる。Wilson の θ 法を用いると時刻 t_{n+1} における応答は時刻 t_n での応答と入力を用いて表される。簡単のため j 次振動に関する添字を省略すると、

$$\dot{y}_{n+1} = a_1 y_n + b_1 \dot{y}_n + c_1 \ddot{y}_n + d_1 g_\theta \quad (4)$$

$$y_{n+1} = a_2 y_n + b_2 \dot{y}_n + c_2 \ddot{y}_n + d_2 g_\theta$$

と表される。ただし、

$$g_\theta = \theta(f_{n+1} + B u_{n+1}) + (1 - \theta)(f_n + B u_n)$$

であり、 $a_1, a_2, \dots, d_1, d_2$ は j 次振動の固有振動数、減衰定数および時間刻みの関数である。 θ は時間刻みに対するパラメータであり、本解析では 1.4 を用いている。 g_θ は時刻 t_{n+1} における制振力 u_{n+1} を含んでいるため式(4)を解くためには、この値を決めることが必要になる。そこで次のような汎関数 H を用いることにする。

$$H = R_1 y_{n+1}^2 + R_2 \dot{y}_{n+1}^2 + R_3 u_{n+1}^2 + \lambda_1 (\dot{y}_{n+1} - a_1 y_n - b_1 \dot{y}_n - c_1 \ddot{y}_n - d_1 g_\theta) + \lambda_2 (y_{n+1} - a_2 y_n - b_2 \dot{y}_n - c_2 \ddot{y}_n - d_2 g_\theta) \quad (5)$$

ここで λ_1, λ_2 は Lagrange のパラメータであり、 R_1, R_2, R_3 は変位、速度および制振力に対する重み係数である。速度 $\dot{y}_{n+1}$ 、変位 y_{n+1} 及び制振力 u_{n+1} に関する H の最小化条件を用いると、制振力が求められる。すなわち、

$$u_{n+1} = e_g \{ (a_1 d_1 R_1 + a_2 d_2 R_2) y_n + (b_1 d_1 R_1 + b_2 d_2 R_2) \dot{y}_n + (c_1 d_1 R_1 + c_2 d_2 R_2) \ddot{y}_n + (d_1^2 + d_2^2) (\theta f_{n+1} + (1 - \theta)(f_n + B u_n)) \} \quad (6)$$

となる。ただし

$$e_g = \frac{1}{R_3 + \theta(d_1^2 R_1 + d_2^2 R_2)}$$

と表される。時刻 t_{n+1} における制振力が決められると、式(4)により各次振動の応答が求められる。本解析による制振力は時間間隔内での汎関数 H の最小条件を満たすものであり、最適レギュレータ理論による制振力との比較については検討する必要があるが、漸化式の形で各時間毎に容易に求めることができる^{5),6)}。このため応答に及ぼす制振力の影響を調べる場合は有用だと思われる。

4. 数値解析とその結果

Fig.1 は解析モデルを示したものであり、構造物の高さは 110m、水深は 100m である。主要部材の直径は 2.0m であり、その剛性は構造物の固有振動数に対応するように変化させている。また構造物の減衰は 2% としている。質量比が 1% となるようにしてデッキ上に TMD を設け、TMD とデッキの間に制振力が作用するようにしている。

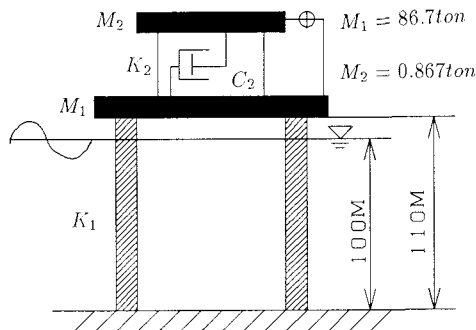


Fig.1 海洋構造物の解析モデル

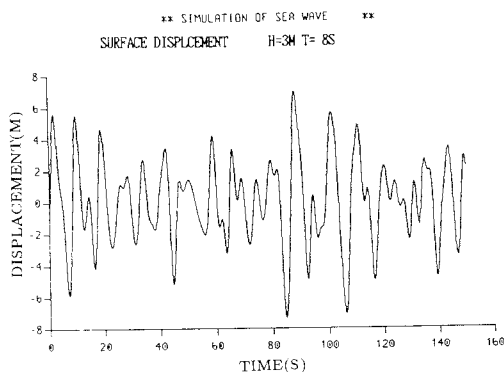


Fig.2 海面波形の時刻歴

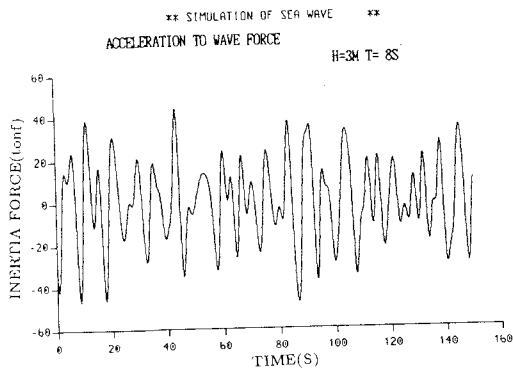


Fig.3 波力の時刻歴

Fig.2はシュミレーションによって求めた平均波高3m、平均周期8秒の海面の運動の時刻歴を示したものである。時間刻みが0.1秒ごとに波を求めており、卓越周期である約8秒の波が主要なものとなっていることが分かる。Fig.3は式(2)で表される波力の慣性力項を示したものである。各水深での水粒子加速度による波力を深さ全体にわたって積分したものであり、卓越周期の8秒の波の他に入力波の加速度成分の影響が加わっていることが分かる。

Fig.4は制振力が作用する場合の構造物の応答を示したものである。構造物の固有振動数が 2.5rad/s であり、平均周期が8秒で平均波高3mの波力に対するデッキの水平方向応答を示している。制振力の決定においては、その重み係数 R_3 がもっとも大きな影響を及ぼしている。本解析では R_1, R_2, R_3 を変えて検討したが、 R_3 の値が最も制振に影響することが分かったので、 $R_1 = R_2 = 1.0$ として R_3 のみが変化する場合を示している。この場合 R_3 は 10^{-3} として、点線は制振力がない場合の応答であり、実線は制振力が作用する場合の応答を示している。制振力の作用により変位応答は約30%に低減されていることがわかる。変位応答は全体に波力の振動に対応したのとなっており、制振力の作用により変位応答は十分低減できることが分かる。

Fig.5は同様に制振力が作用する場合の応答を示したものであり、平均波高5m、平均周期10秒の波力に対するデッキ上での水平変位の時刻歴応答を示したものである。構造物の固有振動数や制振力の重み係数等は前の場合と同様である。波力の平均周期が長くなると変位応答に対して波力の影響が大きくなる。このため制振力による影響が低下することが分かる。

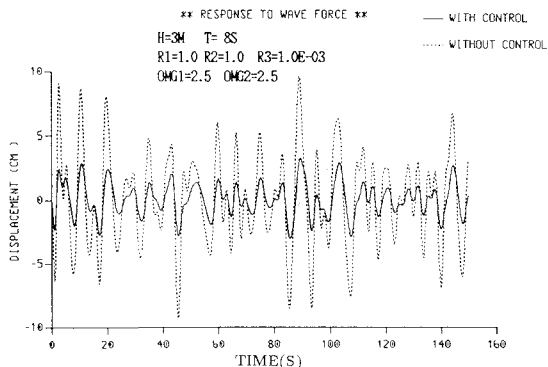


Fig.4 変位応答の時刻歴

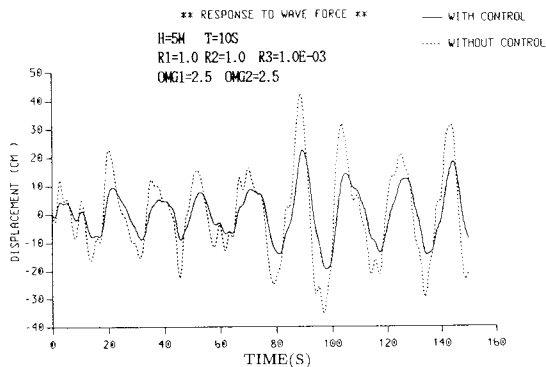


Fig.5 変位応答の時刻歴

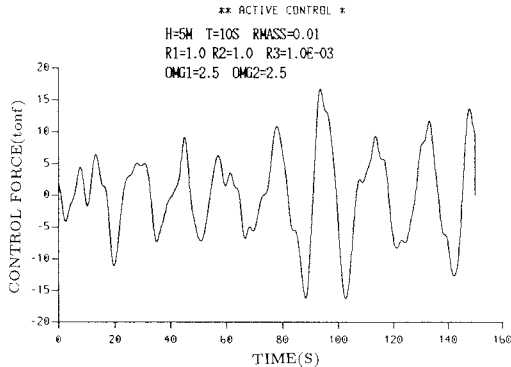
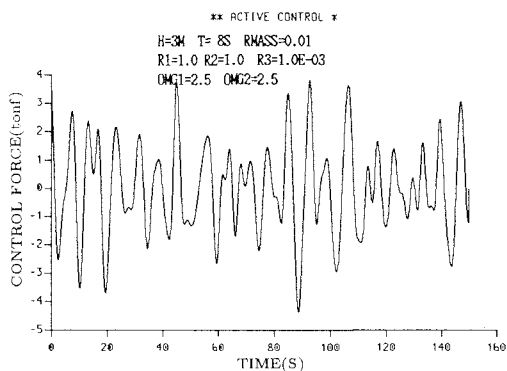


Fig.6 制振力の時刻歴

Fig.6 は先に示した平均波高3m、平均周期8秒と、平均波高5m、平均周期10秒の波力による応答に対する制振力の時刻歴をそれぞれ示したものである。制振力は波力の時刻歴に対応したものとなっている。波力の中で加速度に比例する慣性力項は海面での水粒子の加速度に対応している。このため波力の平均周期が8秒の場合、波力の慣性力項は構造物の固有周期に近づいた振動をすることになり、比較的小きな制振力により効果的な応答の低減ができるものと思われる。一方、波力の平均周期が10秒となり、構造物の固有周期よりも波力の影響が卓越する場合、TMDに制振力を加える本モデルの方法では制振効果が小さくなることを示している。このため水粒子と構造物との相対速度の自乗に比例する抗力項が卓越するような波力が作用する場合、その卓越周期が長くなるに従って制振力の影響が減少するものと思われる。

Fig.7 は平均波高3m、平均周期8秒と平均波高5m、平均周期10秒の波力がそれぞれ作用するとき、構造物の固有振動数が1.5rad/sから4.5rad/sと変化する場合の最大応答変位を示している。横軸は固有振動数であり、縦軸は最大応答変位を示している。実線と破線は制振力に対する重み係数がそれぞれ 10^{-3} と 10^{-2} の場合であり、点線は制振力を加えない場合の応答を示している。構造物の固有振動数が小さい場合、制振力によって変位応答は大幅に減少することが分かる。また固有振動数が大きくなるに従って制振力の影響は減少している。水深100m程度でのジャケット型構造物の固有振動数は概ね2.5rad/sから3.5rad/s程度と考えられ、この範囲では制振力の作用により応答の低減が期待できる。

Fig.8 は同様の波力による応答に対する制振力の最大値を示したものである。制振力に対する重み係数は 10^{-3} と 10^{-2} であり、点線と実線がそれぞれに対応している。構造物の固有振動数が小さくなると制振力は増大していることが分かる。これは構造物の固有振動数が小さくなると、波力の卓越周期に近づくため構造物の応答が増大することによるものと思われる。

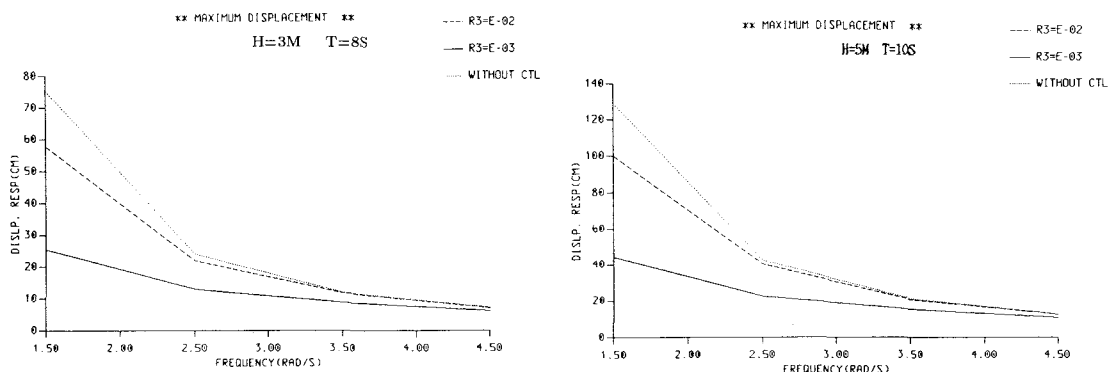


Fig.7 固有振動数に対する最大変位応答

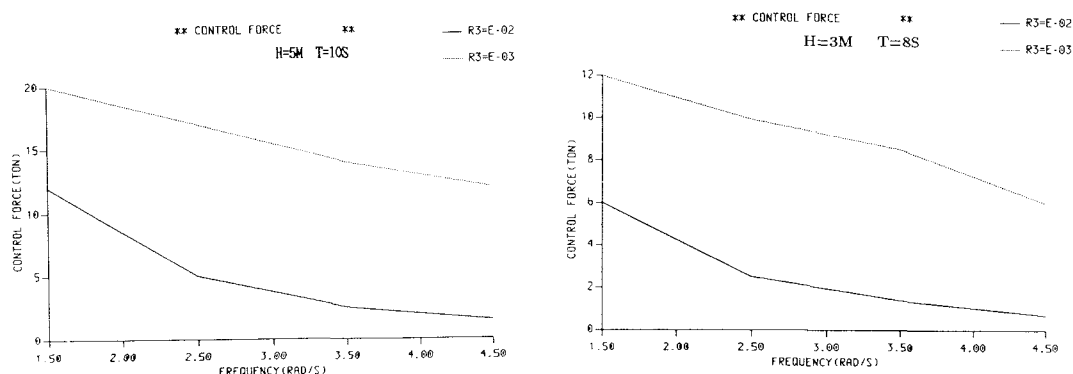


Fig.8 固有振動数に対する最大制振力

Fig.9 は構造物の固有振動数が 2.5rad/s と 4.5rad/s のとき、平均波高 5m 、平均周期 10 秒及び平均波高 3m 、平均周期 8 秒のそれぞれの波力にたいする制振力の最大値を示したものである。横軸は制振力に対する重み係数の変化を示している。重み係数が 10^{-4} のとき構造物の固有振動数に関わらず比較的大きな制振力が必要になる。また重み係数の大きさに関わらず固有振動数が大きくなると、制振力は減少している。これは構造物の固有振動数が大きくなると、波力の卓越周期から離れるため波力が応答を支配するが、その影響は減少する。したがって、制振力も減少することになる。構造物の剛性が増加するとき、制振力を大きくしても波力に対しては、制振の影響は小さくなることが分かる。制振力の重み係数の適切な値を用いることにより、応答を効果的に低減することができるが、このためには波力の卓越周期、構造物の固有振動数等による影響を検討しておくことが必要であることが分かる。

Fig.10 は平均波高 3m 、のとき、平均周期が 6 秒から 10 秒へと変わる場合の最大変位応答に対する制振力の影響を示したものである。構造物の固有振動数は 2.5rad/s である。横軸は平均周期を、縦軸は最大変位応答を表している。実線と破線はそれぞれ制振力に対する重み係数が 10^{-3} と 10^{-2} の場合であり、点線は制振力が作用しない場合の応答を示している。波力の平均周期が長くなると応答は増大しているが、これは構造物の振動特性から見ると、固有周期が長くなることに相当する。一方、入力波の平均周期が短くなると構造物の固有周期の影響を受けやすくなる。制振力に関する重み係数として 10^{-3} を用いると、全体に応答は約半分に低減されることが分かる。また、Fig.11 は同様の波力による応答に対する制振力を示したものである。点線と実線はそれぞれ制振力の重み係数が 10^{-3} と 10^{-2} によるものである。重み係数が 10^{-3} のとき波力の平均周期が 10 秒になると応答が増加するのにもない、制振力も増大している。このように波力の平均周期が長くなると、制振力も急激に増加することがあり、制振力の決定においては構造物の固有振動数と波力の平均周期との関係

を把握しておくことが大切になることが分かる。

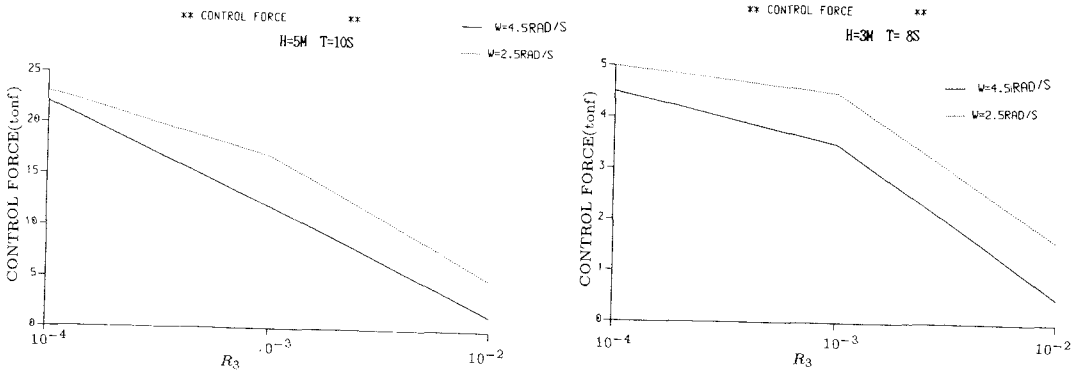


Fig.9 重み係数に対する最大制振力

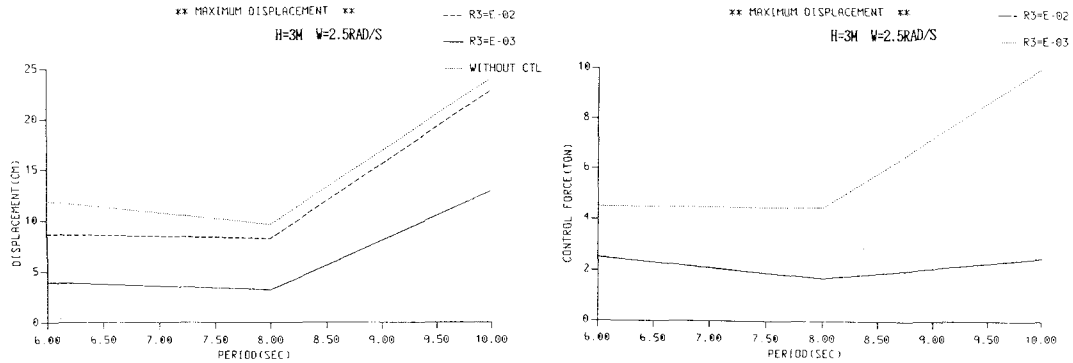


Fig.10 平均周期に対する最大変位応答

Fig.11 平均周期に対する最大制振力

5. あとがき

波力を受ける海洋構造物の動的応答に関する制振の影響について解析を行った。その結果を要約すると次のようになる。

1. 海洋構造物の動的応答は入力波の平均周期、平均波高と構造物の振動特性によって大きく変化するため、構造物の固有振動数に注目したTMDのみでは十分な制振ができない。入力波の卓越周期が長くなり、構造物の固有周期から離れるに従って変位応答では波力の影響が支配的となる。この場合アクティブな制振力を加えることにより効果的に応答の低減を行うことができる。
2. 平均周期が約10秒以下の比較的短い周期を有する波力に対しては制振力の作用によって応答は低減できる。すなわち固有周期が長い構造物では波力の卓越周期にもよるが制振力の作用により応答は大幅に低減できる。一方、構造物の固有周期が短くなると全体に波力による応答が減少し制振力の影響が少なくなる。本解析で用いた制振法では、その重み係数に適切な値を用いると効果的な動的応答の制振が可能である。

3. 波力に対する構造物の応答は一般に固有振動数を大きくすると減少するが、水深の増加にともない、構造物の固有振動数は小さくなり波力の影響が増大する。このため制振力を用いた効果的な応答の低減を行うためには、構造物の振動特性と入力波の特性との関係を明確にしておくことが重要になる。

謝辞 原稿作成にご協力いただいた鹿児島大学工学部 愛甲頼和技官に感謝します。

参考文献

- 1) J.Penzien, M.K.Kaul and B.Berge, 'Stochastic response of offshore towers to random sea waves and strong motion earthquake', Computers and structures, Vol.2, pp.733-756, 1972
- 2) Y.Yamada, K.Kawano, H.Iemura and K.Venkataramana, 'Wave and earthquake response of offshore structures with soil-structure interaction', Proceeding of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng. Vol.5, No.2, 361s-370s, 1988
- 3) 河野健二、吉原進、'海洋構造物の動的応答解析に及ぼすTMDの影響'、構造工学論文集、Vol.38A, pp.797-803, 1992
- 4) 河野健二、吉原進、'制振を考慮した海洋構造物の動的応答解析'、アクティブ制震(振)シンポジウム論文集、pp151-158, 1992
- 5) T. Sato, K. Toki and K. Sugiyama, 'Optimal control of seismic response of structures', Proceedings of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.7, No.1, pp.179s-188s, 1990
- 6) J.N.Yang, A. Akabarpour and P. Ghaemmaghami, 'New optimal control algorithms for structural control', Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.113, No.9, pp.1369-1386, 1987

(1992年9月21日受付)