

制振を受けるジャケット型海洋構造物の動的応答解析

DYNAMIC RESPONSES OF JACKET-TYPE
OFFSHORE STRUCTURE WITH CONTROL FORCE

河野 健二*1 石澤 秀文*2 松本 浩一*3

Kenji KAWANO, Hidefumi ISIZAWA and Koichi MATSUMOTO

The wave force is one of the most important external loads on the dynamic response of the offshore structure. It has generally longer predominant periods than those of the structure. The dynamic response of a jacket type offshore structure is depended upon not only the natural frequency but also the predominant period of the wave force. In this study, the reduction of the dynamic response due to TMD and active control force is examined. It is shown that since the vibration due to the predominant period of wave force has generally important contributions on the dynamic response, TMD provides effective reductions on the response when the natural frequency of the structure is approached to the predominant period of the wave force. While active control force give generally effective reductions on the dynamic response of the structure, the effect decreases as the predominant period of the wave force become longer.

1. まえがき

海洋環境下に建設される構造物は特性の異なる不規則外力を受ける。このような構造物の設計においては不規則な外力の特性を明確にし、その動的応答に及ぼす影響を把握することが重要になる。構造物の強度を十分に確保することに加えて、その動的応答を低減することができれば、より安全で使用性のある構造物の設計が可能になるものと思われる。構造物の動的応答を低減させるためには、構造物の減衰を増加させること、構造物の固有周期を入力外力の卓越周期からできるだけ離すこと等の方法が考えられるが、いずれの方法もその実現は容易でない。このため人為的な動的な外力を加えて構造物の動的応答を制振する方法が研究されるようになった^{2),3)}。海洋構造物において主要な動的な外力は波力であるが、これは一般に不規則な特性を有しており、その制振を考える場合時間領域での表現が必要になる。水深 100m 以上に建設されるジャケット型海洋構造物の固有周期は一般に数秒と長くなるが、波力の卓越周期は構造物のそれよりもさらに長くなり、動的応答に及ぼす影響が大きくなる。このような構造物の制振を考える場合、構造物の固有振動数に注目した TMD⁴⁾等では十分な応答の低減ができないので、より効果的な制振を行う場合アクティブな制振法についても検討を加える必要があると考えられる。

本研究では、波力を受けるジャケット型海洋構造物の動的応答に及ぼす制振の影響を明確にするために、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を用いてシミュレーションにより時間領域での解析を行う。TMD による制振に加え、アクティブな制振について解析を行ない、ジャケット型海洋構造物の効果的な制振法について検討を加える。

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

** 鹿児島大学工学部海洋土木工学科

*** 熊谷組

2. 解析法

2.1 動的応答解析法

波力は一般に不規則な特性を有しており、その動的特性はパワースペクトル密度関数を用いて表される。海面上における水粒子の運動が既知となると、任意の水深における水粒子の運動はそれを用いて表される。水粒子の運動が分かると、構造物に作用する流体力が求められる。このように構造物に作用する流体力は海面上の運動のパワースペクトル密度関数の関数となるため、海洋構造物のアクティブな制振を考える場合、時間領域において流体力を求めることが必要になる。ジャケット型の海洋構造物は一般に複雑な多数の部材から構成される。海洋構造物の動的応答は一般に低次の固有振動数に支配されるため、その応答の特性を把握する場合、1自由度系等の単純化された振動モデルを用いた解析が可能になる。一方、複雑な多数の部材に作用する流体力の影響をより正確に把握するためには、全体系に対するモデル化が必要になる。そこで本解析では Fig.1 に示すようなジャケット型の海洋構造物を用いて動的応答解析を行うことにする。解析においては動的サブストラクチャ法を用いて基礎構造物と上部構造物との動的相互作用を考慮した全体系を扱うことにする。上部構造物は有限要素法を、地盤を含む下部構造物はインピーダンス関数を用いてそれぞれ表される。また動的外力である波力は微小振幅波理論より修正モリソン式を用いて求めることができる。この場合抗力は構造物と水粒子の相対速度の二乗に比例するため非線形となるが、この相対速度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。ところで海洋構造物の制振を行う方法としては種々のものが考えられるが、ここでは Fig.1 に示すように、デッキ上に2本の柱で支持された質量からなる TMD によるパッシブな方法とこの質量とデッキの間に外力を付加するアクティブな方法を用いて制振を行う。波力を受ける海洋構造物にこのような制振力が作用する場合の運動方程式は次のようになる。¹⁾

$$[M + K_m]\{\ddot{x}\} + [C + \bar{K}_D]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F_M\} + \{F_D\} + \{\bar{B}\}u \quad (1)$$

ただし

$$\begin{aligned} [K_m] &= \sum_e \int_e \rho(C_M - 1)V_0[N(z)]^T[N(z)]dz \\ [K_D] &= \sum_e \int_e \frac{\rho}{2}C_D A \sqrt{\frac{8}{\pi}}\sigma_v[N(z)]^T[N(z)]dz \\ \{F_M\} &= \sum_e \int_e \rho C_M V_0[N(\bar{z})]^T[N(z)]\{\ddot{v}\}dz \\ \{F_D\} &= \sum_e \int_e \rho C_D A \sqrt{\frac{8}{\pi}}\sigma_v[N(z)]^T\{\dot{v}\}dz \end{aligned}$$

ここで $[N(z)]$ は各要素に対する形状関数であり、流体力はこれにより等価節点力に変換される。 ρ 、 C_M 、 C_D は海水の密度、質量係数、抗力係数である。 A 、 V_0 は各部材の流れ方向に垂直な断面積、及び体積である。 u はアクティブな制振力であり、 $\{B\}$ はその作用位置に関するものである。また、 $\{\ddot{v}\}$ 、 $\{\dot{v}\}$ は水粒子の加速度及び速度であり、 x 方向における時刻 t でのそれぞれの値は次式で示される。

$$\begin{aligned} \dot{v}_x &= \sum_{j=1}^n \omega_j \sqrt{2S_{\eta\eta}(\omega_j)\Delta\omega} \frac{\cosh[k_j(z+h)]}{\sinh(k_j h)} \cos(k_j x - \omega_j t + \psi_j) \\ \ddot{v}_x &= \sum_{j=1}^n \omega_j^2 \sqrt{2S_{\eta\eta}(\omega_j)\Delta\omega} \frac{\cosh[k_j(z+h)]}{\sinh(k_j h)} \sin(k_j x - \omega_j t + \psi_j) \end{aligned} \quad (2)$$

ただし

$$\omega_j^2 = gk_j \tanh(k_j h)$$

ここで、 h は水深であり、 ω_j は振動数、 k_j は波数をそれぞれ表している。また ψ_j は $0 \leq \psi_j \leq 2\pi$ の間にある一様乱数である。 $S_{\eta\eta}(\omega_j)$ は海面上での運動を表すパワースペクトル密度関数であり、ブレットシュナイダー型を用いると平均周

期 $\bar{T}$ 、平均波高 $\bar{H}$ の関数として次のように表される。

$$S_{\eta\eta}(\omega_j) = \frac{4210}{\omega_j^5} \left(\frac{\bar{H}}{\bar{T}^2} \right)^2 \exp \left[-1052 \left(\frac{1}{\omega_j \bar{T}} \right)^4 \right] \quad (3)$$

このように海面上の運動が式 (3) で与えられると、式 (2) により任意の水深での水粒子の速度、及び加速度がシミュレーションにより求められる。この結果を用いると式 (1) より流体力に対する等価節点力を求めることができる。一般に海洋構造物の設計の対象となるような波力の卓越周期は 10 秒程度以上であり、構造物の固有周期から離れたものとなる。このため上部構造物の動的解析においては、基礎を固定した場合の固有値解析を行い、低次の振動モードのみを用いてその動的応答が表される。

基礎構造物が杭基礎によって支持される時、地盤を含む基礎系の動的特性はインピーダンス関数を用いて表される。これより動的サブストラクチャ法を用いると、全体系の運動方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} [I] & [\bar{M}_{ap}] \\ [\bar{M}_{pa}] & [M_{pp}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{q}\} \\ \{\ddot{x}_p\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [2\beta_{fj}\omega_{fj}] & [0] \\ [0] & [\bar{C}_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{q}\} \\ \{\dot{x}_p\} \end{Bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} [\omega_{fj}^2] & [0] \\ [0] & [\bar{K}_p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{q\} \\ \{x_p\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_a \\ P_b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_{ua} \\ F_{ub} \end{Bmatrix} u \quad (4) \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned} \{P_a\} &= [\Phi]^T (\{F_M\} + \{F_D\}), & \{F_{ua}\} &= [\Phi]^T \{\bar{B}\} \\ \{P_b\} &= [G]^T [L]^T (\{F_M\} + \{F_D\}), & \{F_{ub}\} &= [G]^T [L]^T \{\bar{B}\} \\ [L] &= -[K_{aa}]^{-1} [K_{ab}], & \{x_a\} &= [\Phi]^T \{q\} \end{aligned}$$

ここで添字 a は拘束されていない節点に、また p は基礎の節点にそれぞれ対応している。[G] は上部構造物と下部構造物との変形の対応を示しており、 $\{x_a\}$ は基礎固定時における上部構造物の動的変位を表している。[Φ] はその場合の非減衰時におけるモーダルマトリックス、 $\{q\}$ は一般化座標を表している。アクティブな制振力 u が作用しない場合は式 (4) の右辺の第 2 項を除いて、構造物の動的応答を求めることができる。一方、アクティブな制振を行う場合は、この制振力を与えることによって同様に動的応答を求めることができる。

2.2 制振力の評価法

制振力を用いて応答を低減するとき、最も少ない外的エネルギーの付加により最も効果的な制振を行うことが必要になる。また制振力の最大値には制限があり、その時間遅れ等が生じても効果的な制振を果たすことも必要である。海洋構造物に作用する主要な波力の卓越周期は約 10 秒程度となり長い場合、効果的な制振力の発生法が問題になるものと思われる。このような場合、主要な波力の卓越周期は構造物の固有周期よりも長くなるが、ここでは制振力をデッキ上にある TMD の付加質量とデッキの間に作用させるようにする。波力の卓越周期が長くなれば、この方法では十分な制振力を発生させることはできないが、本解析で扱うようなモデルでは最大で 20tonf 程度の制振力による場合を考えることにする。このような場合の制振力の評価法としては各時刻毎に構造物の速度と変位応答の二乗和と制振力の二乗和からなる汎関数の最小化を行うことによって、その値を求めることにする^{2),5)}。このような逐次最適化を行う場合、各時刻毎にそれぞれの応答の近似を行う必要がある。本解析では、Wilson の θ 法を用いて各時刻での応答を表すことにする。そこで式 (4) を用いて動的解析を行う場合、再び固有値解析を行い、各次モード毎に応答を表すと、時刻 t において

$$\ddot{y}_j(t) + 2\beta_{fj}\omega_{fj}\dot{y}_j(t) + \omega_{fj}^2 y_j(t) = f_j(t) + B_j u(t) \quad (5)$$

と表される。ここで制振力 $u(t)$ を決めるためには、各時間毎の応答を漸化式の形で求める必要がある。Wilson の θ 法を用いると、時刻 t_{n+1} における応答 $y_j(n+1)$ 、 $\dot{y}_j(n+1)$ は

$$\begin{aligned}\dot{y}_j(n+1) &= a_1 y_j(n) + b_1 \dot{y}_j(n) + c_1 \ddot{y}_j(n) + d_1 g_\theta \\ y_j(n+1) &= a_2 y_j(n) + b_2 \dot{y}_j(n) + c_2 \ddot{y}_j(n) + d_2 g_\theta\end{aligned}\quad (6)$$

と表される。ただし $g_\theta = \theta(f_j(n+1) + Bu(n+1)) + (1-\theta)(f_j(n+1) + Bu(n))$ であり、係数 $a_1, a_2, \dots, d_2$ は j 次振動に関するパラメータであり、本解析では 1.4 を用いている。時刻 t_{n+1} での応答はこのように式 (6) を用いて求められるが、この式は g_θ の中に t_{n+1} における制振力 $u(n+1)$ を含むため、この値を先に決める必要がある。そこで構造物の運動エネルギーとひずみエネルギー及び制振力によるエネルギーからなる汎関数を考える。この場合の応答は固有ベクトルによる変換を行っているため、変換された一般化座標系 y_j に関して

$$H = \sum_j (R_{1j} \dot{y}_j^2(n+1) + R_{2j} y_j^2(n+1)) + R_3 u^2(n+1) + \lambda_1 \sum_j \dot{y}_j(n+1) + \lambda_2 \sum_j y_j(n+1) \quad (7)$$

と表される。ここで R_{1j}, R_{2j}, R_3 はそれぞれの重み係数であり、 λ_1, λ_2 はそれぞれ Lagrange の未定係数である。 $\dot{y}_j(n+1)$ 、 $y_j(n+1)$ 、 $u(n+1)$ 、 λ_1 及び λ_2 に関して式 (7) の最小化を行うと制振力 $u(n+1)$ は

$$u(n+1) = -(C_{1j} y_j(n) + C_{2j} \dot{y}_j(n) + C_{3j} \ddot{y}_j + C_{4j} F_j) / C_{0j} \quad (8)$$

ただし

$$\begin{aligned}C_{0j} &= R_3 + \sum_j (R_{1j} d_1^2 + R_{2j} d_2^2) (\theta B)^2 \\ C_{1j} &= \sum_j (R_{1j} a_1 d_1 + R_{2j} a_2 d_2) \theta B \\ C_{2j} &= \sum_j (R_{1j} b_1 d_1 + R_{2j} b_2 d_2) \theta B \\ C_{3j} &= \sum_j (R_{1j} c_1 d_1 + R_{2j} c_2 d_2) \theta B \\ C_{4j} &= \sum_j (R_{1j} d_1^2 + R_{2j} d_2^2) \theta B \\ F_j &= \theta f_j(n+1) + (1-\theta)(f_j(n) + Bu_{n+1})\end{aligned}$$

と表される。このように一般化された座標系における各次モードの応答が各時刻毎に求まると前時刻での応答を用いて現時刻での制振力を逐次得ることができる。この場合、それぞれの重み係数によって制振力は異なるため、その影響については初めに検討しておくが必要になる。

3 解析結果

3.1 時刻歴応答からみた制振の影響

本解析では Fig.1 に示すように、デッキ上に TMD を有するジャケット型の海洋構造物をモデル化し、基礎構造物との動的相互作用を考慮した全体系モデルを用いて波力を受ける場合の動的応答に対する制振について検討を加える。構造物の高さは 185m、水深が 170m であり、主要部材の直径は 2.0m とし、部材の剛性は側面の厚さに従って変化させている。地盤のせん断波速度は 100m/s であり、構造物の振動は面内で、上部構造物の 1 次振動の減衰定数は 2% である。Fig.2 は式 (3) で示すように海面の運動を表すプレットシュナイダー型のパワースペクトル密度関数を示したものである。平均波高が 7m の場合のとき、平均周期が 8 秒、10 秒、12 秒の場合を示している。平均周期が長くなるにしたがって波力の卓越周期は低振動数側に移動し、そのピークは増大することが分かる。一般にジャケット型の海洋構造物の固有周

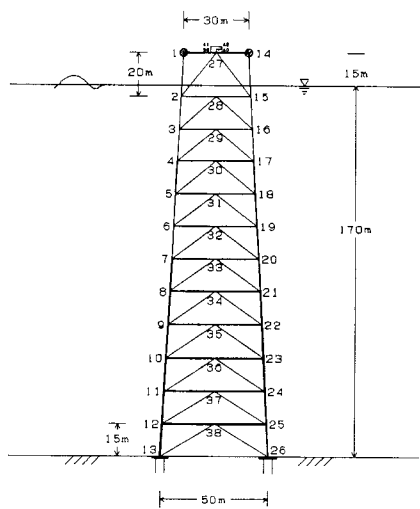


Fig.1 ジャケット型海洋構造物の解析モデル

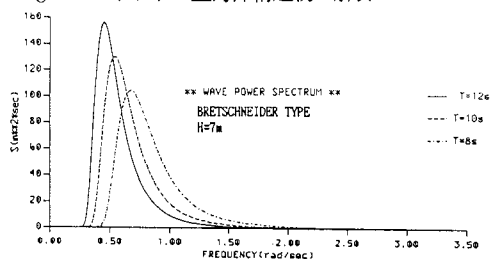


Fig.2 パワースペクトル密度関数

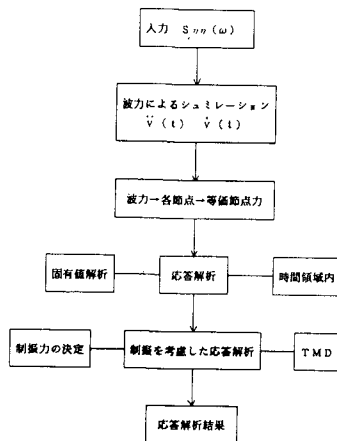


Fig.3 解析フローチャート

期は数秒であるが、この値よりもさらに長周期側にある。このため構造物系の剛性を高くし、固有周期を短くすることにより波力に対する応答を低減することが考えられる。

ところで、波力は一般に不規則な特性を有するため、ジャケット型の海洋構造物の動的応答解析は振動数領域で行われる。しかしながら2.で述べたように海洋構造物の制振を考える場合、時間領域での解析が必要になる。そこで制振を考慮した波力を受ける海洋構造物の動的解析はFig.3に示すようなフローチャートに従って進められる。すなわち式(2)で示すように任意の水深における水粒子の速度及び加速度をシミュレーションによって求める。この場合各要素上では任意点での流体力を等価節点力として表すことになるが、その分割は約50程度が必要になる。これは各水深での水粒子の運動が指数関数を含む関数となり簡単な近似ができないためである。図に示すように波力による等価節点力が得られると、制振力を評価することにより動的応答解析を行うことができる。

Fig.4は平均波高7m、平均周期12秒の波力に対するFig.1に示す構造物のデッキ上での水平方向に関する加速度応答を示したものである。構造物系の固有振動数は1.55rad/s(4.05s)と2.86rad/s(2.18s)の場合であり、TMDの質量比は0.5%(22tonf)である。破線はTMDを除いた構造物だけの応答を示したものであり、点線はTMDを含む場合の応答である。また実線は制振力を加えた場合の応答である。制振力を求める場合、それぞれの重み係数によってその大きさが異なってくるが、本解析では R_{1j} 、 R_{2j} は1.0とし、 R_3 のみを変化させている。一般に R_3 の値を小さくすると制振力の値は増加するが、ここでは 1×10^{-3} を用いている。TMDのみを用いた場合、時間の経過に従って位相の変化が生じ全体に応答は若干減少する。加速度応答は構造物系の固有振動数にかかわらず全体に応答は低減されている。この場合の制振力の最大値は構造物の固有振動数が1.55rad/sに対して約5tonf、固有振動数が2.86rad/sに対して約12tonfとなっている。

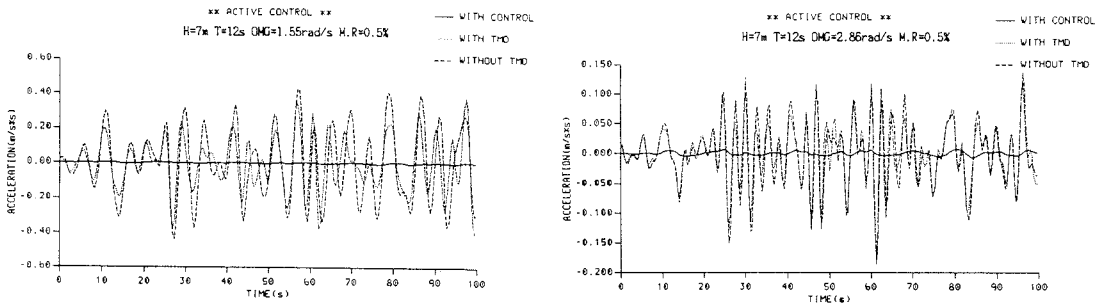


Fig.4 節点1の加速度応答時刻歴

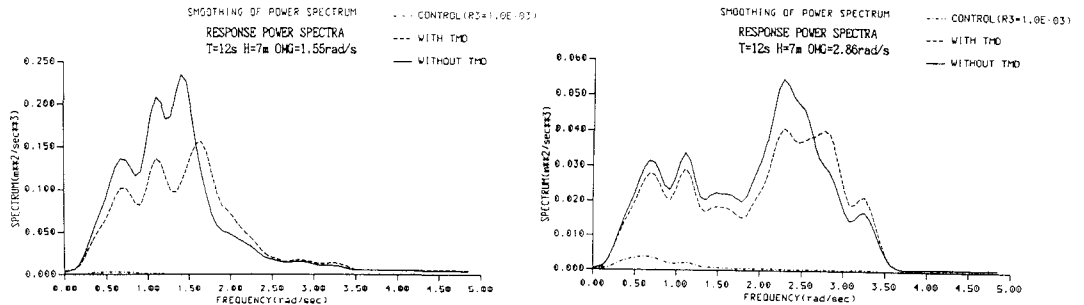


Fig.5 加速度応答のパワースペクトル

Fig.5 は同様の応答に対するパワースペクトルを示している。実線は TMD を除いた構造物のみの場合の、破線は TMD を含む場合の、一点鎖線は制振力を加えた場合の応答に対するそれぞれのパワースペクトルを示している。構造物の固有振動数が 1.55 rad/s と低い場合、波力の卓越周期と連成した振動となり全体に応答は大きくなっている。一方構造物の固有振動数が 2.86 rad/s になると構造物系の振動によるものと、波力の卓越周期による応答がそれぞれ全体の応答に寄与していることが分かる。TMD のみによる制振では、構造物系の固有振動数が波力の卓越周期から離れるに従って、その影響が減少するが、加速度応答は波力を受ける場合においても、構造物の固有振動数の影響が大きいため、十分に低減されているものと思われる。

Fig.6 は同様に平均波高 7 m 、平均周期 12 秒 の波力に対する構造物のデッキ上での水平方向の変位応答を示したものである。ここで構造物及び TMD は前図の場合と同じである。破線は TMD を除いた構造物のみの場合の、点線は TMD を含む場合の、実線は制振力を加えた場合のそれぞれに対する応答を示している。構造物の固有振動数が 1.55 rad/s のとき、TMD によって応答は若干低減されるが、構造物の固有振動数が 2.86 rad/s になると、TMD による効果はさらに減少することが分かる。これは構造物の固有振動数が 1.55 rad/s のとき、構造物と波力の振動が連成するため TMD による影響が増加したものと考えられる。一方、波力に対する変位応答は構造物の剛性を大きくすれば、波力の卓越周期による振動が支配的となるため TMD による制振の影響は減少する。さらに制振力を加えた場合の応答は十分に低減されているが、構造物と波力の卓越周期の影響が連成する場合の方が、制振力の効果は大きくなっている。

Fig.7 は同様の変位応答に対してパワースペクトルを示したものである。実線は TMD を除いた場合の、破線は TMD を含む場合の、点線は制振力を加えた場合のそれぞれの変位応答に関するパワースペクトルを示している。固有振動数にかかわらず、これらの構造物の変位応答は波力の卓越周期による振動が主要なものとなっていることが分かる。このため構造物の固有振動数が 1.55 rad/s の場合のように波力の卓越周期と連成する場合は TMD によって応答の低減が生じるが、固有振動数が 2.86 rad/s と大きくなるとその影響が大きく減少することが分かる。一方、制振力を加えることによって変位応答は効果的に低減されるが、構造物の固有振動数が大きくなると、制振力による効果は減少することが分かる。

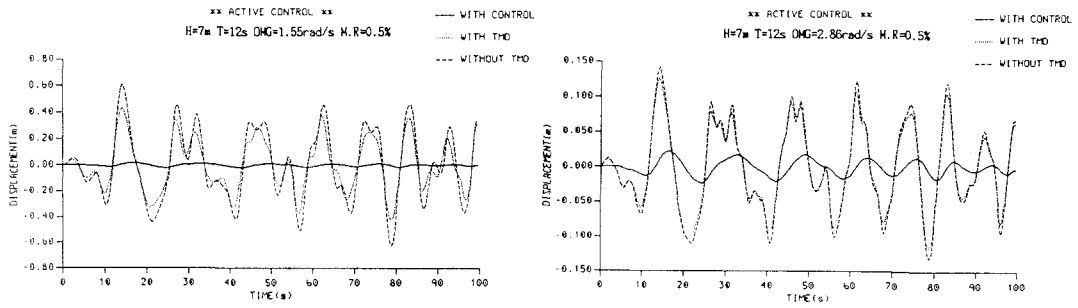


Fig.6 節点1の変位応答時刻歴

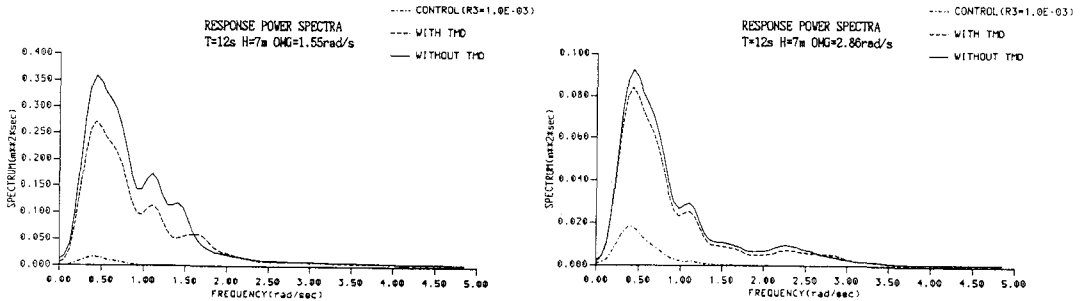


Fig.7 変位応答のノースペクトル

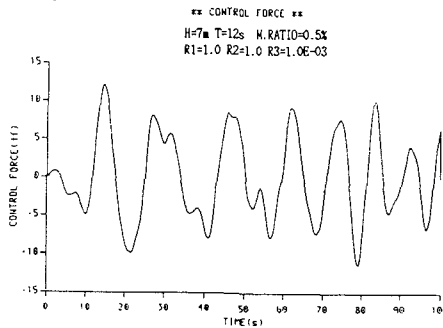


Fig.8 制振力の時刻歴

Fig.8は平均波高7m、平均周期12秒の波力が構造物が受ける場合の、制振力の時刻歴を示したものである。この場合構造物の固有振動数は2.86rad/sがあり、重み係数 R_3 は 1×10^{-3} である。制振力は全体に変位応答に対応したものとなっている。入力波の平均周期が構造物の固有振動数から離れるため、応答は全体に波力による影響が支配的になる。したがってこのような場合の制振力は入力波の特性に支配されたものとなると考えられる。

3.2 最大応答からみた制振の影響

Fig.9は構造物の固有振動数が1.55rad/sと2.86rad/sの2つの場合について、平均波高7mで平均周期が8秒から14秒の波力が作用する場合の速度応答の最大値を示したものである。実線はTMDを除いた場合の、破線はTMDを含む場合の、一点鎖線は重み係数 R_3 が 1×10^{-3} に対する制振力が作用する場合の、二点鎖線は R_3 が 5×10^{-3} に対する場合のそれぞれの応答を示している。制振力が作用しない場合、全体に入力波の平均周期が増加するに従って応答は減少する。特に構造物の固有振動数が1.55rad/sの場合、応答は構造物の固有振動数と波力の卓越振動数による振動が連成するため、TMDによって応答は比較的良好に低減されることが分かる。一方、制振力を加える場合、構造物の固有振動数や波力の平均周期にかかわらず全体に速度応答は低減されている。特に構造物の固有振動数が1.55rad/sのとき、制振力を加えることによって速度応答は効果的に低減されることが分かる。

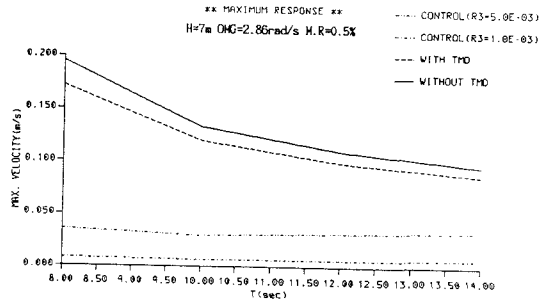
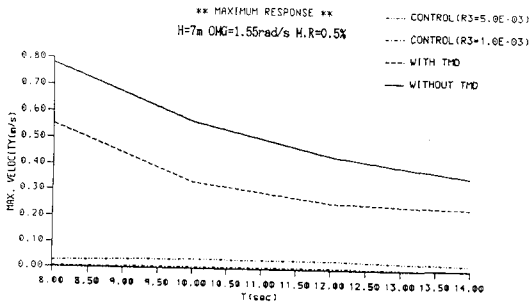


Fig.9 最大速度応答に及ぼす平均周期の影響

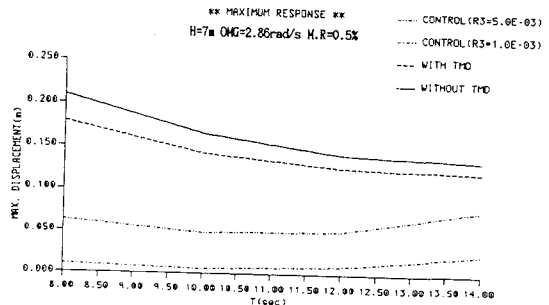
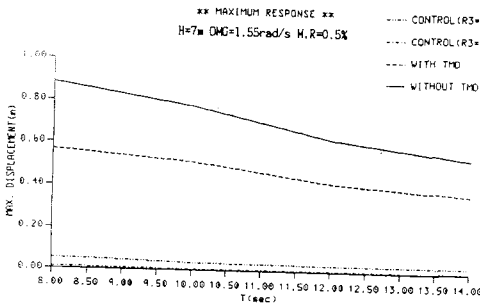


Fig.10 最大変位応答に及ぼす平均周期の影響

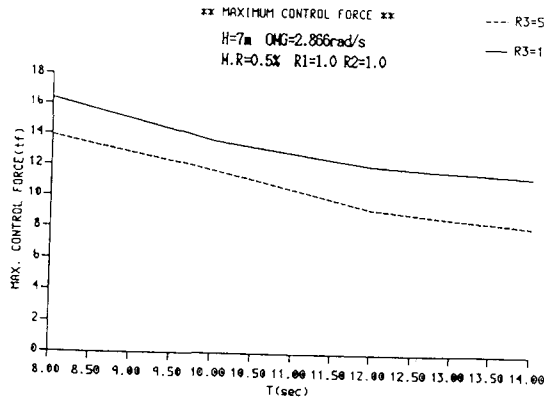


Fig.11 最大制振力に及ぼす平均周期の影響

Fig.10 は前図の場合と同様に平均周期の異なる波力が構造物に作用する場合の変位応答の最大値を示したものである。実線と破線で示された TMD を除いた場合と含む場合の応答は入力波の平均周期が長くなると全体に減少する。そして構造物の固有振動数が 1.55rad/s のとき、構造物系の振動の影響が増加するため、全体に TMD による低減効果は固有振動数が 2.86rad/s のときに比べて大きくなる。一方、一点鎖線及び二点鎖線で示された応答は制振力を加えた場合の応答である。構造物の固有振動の影響が大きい 1.55rad/s の場合、どの平均周期の波力に対しても効果的な制振を示している。これに対して固有振動数が 2.86rad/s の場合、重み係数 R_3 によって制振効果が異なり、特に入力波の平均周期が長くなると、その影響が減少することが分かる。

Fig.11 は構造物の固有振動数が 2.86rad/s で平均周期 7m の波力を受ける構造物の応答に対する最大制振力を示したものである。入力波の平均周期が長くなると、全体に最大制振力は減少する傾向を示している。制振力は主に重み係数 R_3 によって変化するため、制振力の決定に当たっては特に R_3 の及ぼす影響を検討しておくことが必要になると思われる。

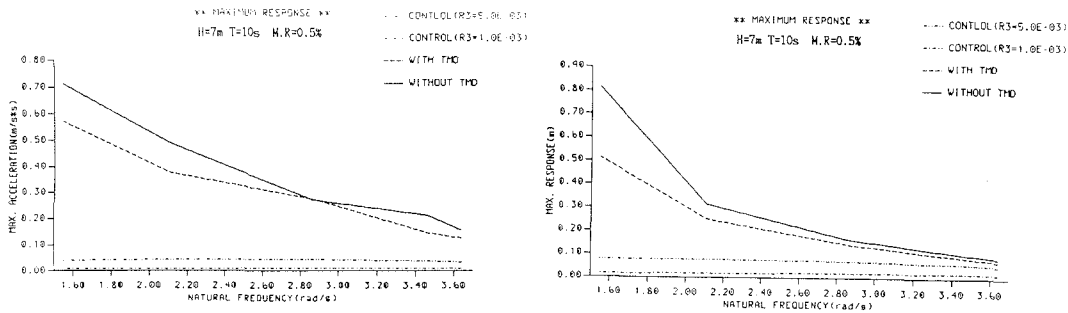


Fig.12 最大応答に及ぼす構造物の固有振動数の影響

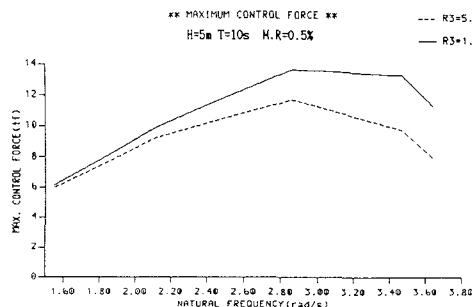


Fig.13 最大制振力に及ぼす構造物の固有振動数の影響

Fig.12は平均波高7m、平均周期10秒の波力を受けるとき、構造物の固有振動数が1.55rad/sから3.65rad/sと変化する場合のデッキ上における水平方向の加速度応答及び変位応答の最大値を示したものである。実線及び破線はTMDを除いた場合と、含む場合の応答をそれぞれ示している。また一点鎖線及び二点鎖線は制振力を加えた場合であり、それぞれ重み係数 R_3 が 1×10^{-3} と 5×10^{-3} の場合を示している。制振力を加えない場合、これらの異なる固有振動数を有する構造物の応答は、その増加に伴って全体に減少する。TMDによる加速度応答の低減効果は、前述したように、構造物の固有振動数が波力の卓越周期に近づき、振動が連成するとき増加する。また制振力を加えると加速度応答は大きく低減される。これは加速度応答は構造物の固有振動数による振動が主要なものとなることによるものである。一方、変位応答も同様に構造物の固有振動数が大きくなると全体に減少する。変位応答では、波力の卓越周期での振動が主要となるため構造物の固有振動数が大きくなるにしたがってその影響が減少する。このためTMDによる制振では固有振動数が小さいとき、その影響が増加する。一方、制振力を加えた場合、重み係数 R_3 によって制振の程度は異なっているが、応答の大きさは固有振動数に対して同様の結果を示している。

Fig.13は同様に平均波高7m、平均周期10秒の波力に対して、構造物の固有振動数が1.55rad/sから3.65rad/sと変化する場合の制振力を示したものであり、実線は重み係数 R_3 が 1×10^{-3} の、破線は 5×10^{-3} の場合の制振力を示している。構造物の固有振動数が波力の卓越周期に接近すると制振力も全体に増加するが、約2.8rad/sを越えると若干減少する傾向が見られる。これは構造物の固有振動数が波力の卓越周期から離れるにしたがって、波力の卓越周期での振動が主要となるため、TMDに制振力を加える方法ではその制振効果が減少することによるものと考えられる。

4 あとがき

波力を受けるジャケット型海洋構造物の動的応答に及ぼす制振の影響について検討を加えた。本解析で得られた結果をまとめると次のようである。

1. 波力を受けるジャケット型海洋構造物の動的応答は、加速度及び速度応答に関して構造物の固有振動数による振動が、変位応答に関しては波力の卓越周期による振動がそれぞれ主要なものとなる。このため構造物の固有振動数が波力の平均周期から離れると、TMD による応答の低減効果は減少する。アクティブな制振力を加えると、このような場合でも応答は低減できるが、波力の卓越周期が長くなるに従って、その制振の影響が減少する。
2. 波力の平均周期に構造物の固有振動数が近づくに従って TMD による制振の効果は大きくなり、特に加速度応答に対する影響が大きい。一般には海洋構造物の固有振動数は波力の卓越周期からできるだけ離すことが行われるので、TMD のみだけでは十分な応答の低減はできないが、制振力を加えることによってさらに効果的な制振を行うことができる。
3. 平均波高や平均周期の比較的小さい波力に対しては、構造物系の振動による応答が主要なものとなるため、TMD 等により応答を低減することができる。さらに比較的小さな制振力によって効果的な応答の低減ができると、構造物の使用性の向上が期待される。このため波力が設計波に相当するような場合以外でも、アクティブな制振を行えばより安全で使用性のある海洋構造物になるものと思われる。

参考文献

- 1) R.Sigbjornsson,K.Bell and I.Holand,'Dynamic response of framed and gravity structures to waves',Numerical Method in Offshore Eng. John Wiley and Sons,Edited by O.C.Zienkiewicz et al,pp.245-280,1978
- 2) J.N.Yang,A.Akabarbour and P.Ghaemmaghami,'New optimal control algorithms for structural control',ASCE,Vol.113,No.9,pp.1369-1386,1987
- 3) T.Satou,K.Toki and K.Sugiyama,'Optimal control of seismic response of structures', Pro.of JSCE,Struct. Eng./Earth. Eng.,Vol7,No.1,pp179s-188s,1990
- 4) 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,pp797-803,1992
- 5) 河野健二、吉原進、'海洋構造物の動的応答解析に及ぼす制振の影響'、構造工学論文集、Vol.39A,pp681-688,1993

1993 年 9 月 16 日受付