

海洋構造物の動的応答解析に及ぼす TMD の影響

TMD EFFECTS ON DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS OF OFFSHORE STRUCTURE

河野健二*¹ 吉原 進**²

Kenji KAWANO, Susumu YOSHIHARA

TMD effects on dynamic response of offshore platform to random sea waves is investigated. Emphasis is placed upon the passive and active control effects on the dynamic response evaluation. Governing equation of motion including dynamic soil structure interaction is derived by the substructure method. The random sea waves are modelled stochastically using the Bretschneider's wave spectrum and Morison's equation describes the wave force. The response analysis is carried out using the frequency domain random vibration approach. It is shown that the dynamic response of offshore structure can be effectively reduced using TMD system with active control system.

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、合理的な設計を行うために必要である。海洋構造物の受ける動的外力としては、波力、地震力等があるが、この中で波力の周期は約 10 秒程度あり、地震の卓越周期と大きく異なっている。このように動的特性の異なる外力の影響を正確に把握しておくことは、信頼性のある海洋構造物の動的応答評価を行う上で重要であると思われる。さらに制振構造を用いて動的外力に対する構造物の応答を低減できれば、より合理的な設計ができるものと考えられる。そこで本研究では制振構造の一つである TMD 系を有するジャケット型の海洋構造物が波力を受ける場合の動的応答解析を行い、動的応答に及ぼす TMD の影響について検討を加えた。さらに TMD にアクティブな制振力を加えた場合、これが海洋構造物の動的応答に及ぼす影響についても検討を加えた。

2. 動的応答解析法

2.1 全体系の運動方程式

本研究では、TMD 系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に対して、波力を受ける場合の動的応答解析を行う。図-1 は解析モデルを示したものであり、上部構造物は有限要素法を用いて表すことができる。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ることができる。この場合、波力の中で抗力は速度と構造物の速度との相対速度に比例するため非線形となる。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。¹⁾ 本解析では図-1 に示すように海面上にあるデッキ上のみに TMD を設置し、この TMD に制振力を加

* 工博 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木開発工学科(鹿児島市郡元 1-21-40)

** 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木開発工学科

える場合を考える。したがって、TMD系を有し、制振力を受けるとき、基礎を固定した上部構造物に波力のみが作用する場合の運動方程式は、

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

と表される。ただし、

$$\begin{aligned} [K_m] &= [\sqrt{\rho(C_M - 1)V}] \\ [\bar{K}_D] &= [\sqrt{\frac{8}{\pi}}\rho C_D \frac{A}{2}\sigma_r] \\ [K_M] &= [\sqrt{\rho C_M V}] \\ \{r\} &= \{v - \dot{x}\} \end{aligned}$$

ここで u はTMDに作用する制振力を表している。また $[M], [C], [K]$ はそれぞれ上部構造物の質量、減衰および剛性マトリックスである。 $v_a, \dot{v}_a$ は水粒子の速度および加速度である。 ρ は海水の密度、 V, A はそれぞれ流れ方向の部材の体積及び面積であり、 C_M, C_D は質量係数と抗力係数である。 $\{\bar{B}\}$ はTMDに加える制振力の作用点を示している。ところで海水の運動は不規則であり、一般にパワースペクトル密度関数を用いて表される。海面運動のパワースペクトル密度関数をブレットシュナイダー型で表すと、設計の対象となるその関数の平均周期は約10秒程度となり、構造物の固有周期から十分離れたものとなる。このため上部構造物の動的応答解析では、固有値解析を行い、最初の10次程度までの振動モードを考慮すればよいことになる。この場合動的応答解析に用いる運動方程式の自由度は大幅に低減される。一方、基礎－地盤系の動的特性はインピーダンス関数を用いて表される。上部構造物と基礎－地盤系の動的相互作用を考慮すると、動的サブストラクチャ法を用いて全体系の運動方程式を表す事ができる。²⁾したがって、全体系の運動方程式は、

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

と表される。ただし、

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} [P_a] \\ [P_b] \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [\Phi]^T[K_M] & [\Phi]^T[K_D] \\ [G]^T[L]^T[K_M] & [G]^T[L]^T[K_D] \end{bmatrix} \\ [\bar{M}] &= [M + [K_M]] \\ \{F_{ua}\} &= [\Phi]^T\{\bar{B}\} \\ \{F_{up}\} &= [G]^T[L]^T\{\bar{B}\} \\ [L] &= -[K_{aa}]^{-1}[K_{ab}] \\ \{x_a^c\} &= [\Phi]^T\{q\} \end{aligned}$$

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。 $[G]$ は上部構造物と基礎構造物との関係を表している。 $\{x_a^c\}$ は上部構造物の基礎固定時の動的変位であり、 $[\Phi]$ 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。

2.2 制振力の評価法

TMDを有する海洋構造物が制振力を受ける場合、全体系の運動方程式は式(2)で表される。この運動方程式は上部構造系の応答を支配する低次の振動と下部構造系の振動から構成される。この全体系の固有値解析を

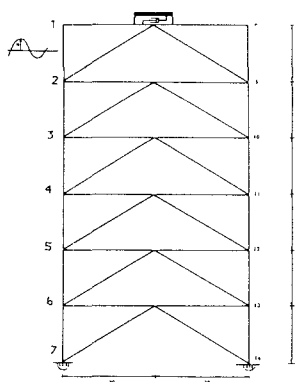


図-1 TMDを有する海洋構造物の解析モデル

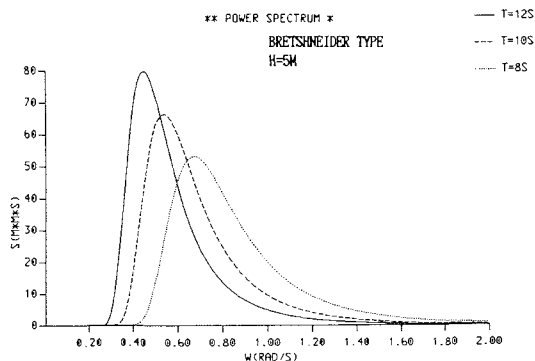


図-2 波のパワースペクトル密度関数

行くと固有振動数は低次振動モードにおいて十分離れており、振動モード間の連成が応答に及ぼす影響は小さいと考えられる。³⁾ そこで式(2)に再び固有値解析を適用すると

$$\{f_u\} = \{\ddot{y}\} + [\wedge 2\beta_j \omega_j \wedge] \{\dot{y}\} + [\wedge \omega_j^2 \wedge] \{y\} - [f_1] \{\dot{v}_a\} - [f_2] \{v_a\} - \{B\} u = \{0\} \quad (3)$$

と表される。ただし、

$$\begin{bmatrix} [f_1] \\ [f_2] \end{bmatrix} = [\Psi]^T \begin{bmatrix} [P_a] \{ \dot{v}_a \} \\ [P_b] \{ v_a \} \end{bmatrix} \quad \{B\} = [\Psi]^T \begin{Bmatrix} \{F_{ua}\} \\ \{F_{up}\} \end{Bmatrix} \quad \begin{Bmatrix} \{q\} \\ \{x_p\} \end{Bmatrix} = [\Psi] \{y\}$$

ここで制振力 u を加えた場合の応答の汎関数として次の関数を考える。^{4),5)}

$$Q = \{\dot{y}\}^T [R_1] \{\dot{y}\} + \{y\}^T [R_2] \{y\} + u^2 [R_3] + \{\lambda\}^T \{f_u\} \quad (4)$$

ただし、 $[R_1]$, $[R_2]$, $[R_3]$ はそれぞれの重み係数であり、 $\{\lambda\}$ はラグランジュのパラメータである。汎関数 Q の最小化の条件より $\{\lambda\}$ が決定され、制振力 u が決定される。すなわち、

$$\frac{\partial Q}{\partial \{\dot{y}\}} = 0 \quad \frac{\partial Q}{\partial \{y\}} = 0 \quad \frac{\partial Q}{\partial u} = 0 \quad \frac{\partial Q}{\partial \{\lambda\}} = 0 \quad (5)$$

これより制振力は

$$u = \frac{1}{2R_3} \{B\}^T [A_0] (\{\ddot{y}\} - [f_1] \{\dot{v}_a\} - [f_2] \{v_a\}) \quad (6)$$

と表される。ただし、

$$[A_0] = \left[\frac{1}{2} [\wedge 2\beta_j \omega_j \wedge] [R_1]^{-1} [\wedge 2\beta_j \omega_j \wedge] + \frac{1}{2} [\wedge \omega_j^2 \wedge] [R_2]^{-1} [\wedge \omega_j^2 \wedge] + \frac{1}{2R_3} \{B\} \{B\}^T \right]^{-1}$$

ここで第一項が応答によるものであり、第二項が外力によるものである。したがってこの制振力を式(3)へ再び代入すれば、制振力を受ける場合の応答を求めることができる。⁶⁾

2.3 動的応答解析

海水の速度や加速度は一般に不規則な振動をするものとして扱われる。このため海面の運動を表すパワースペクトル密度関数としてブレットシュナイダー型を用いると、微小振幅波理論により水粒子の速度、加速度のパワースペクトル密度関数を求める事ができる。したがって平均周期と平均波高をパラメータとして波力のパワースペクトル密度関数 $[S_{ff}(\omega)]$ が求められる。ところで、制振力を受ける場合の構造物全体系の運動方程式は式(3)、式(6)から

$$[a_0] \{\ddot{y}\} + [\wedge 2\beta_j \omega_j \wedge] \{\dot{y}\} + [\wedge \omega_j^2 \wedge] \{y\} = [\tilde{f}_1] \{\dot{v}_a\} + [\tilde{f}_2] \{v_a\} \quad (7)$$

と表される。ただし、

$$[a_0] = [\tilde{1}] - [\tilde{A}] \quad [\tilde{f}_a] = [f_a] - [\tilde{A}][f_a] \quad [\tilde{f}_b] = [f_b] - [\tilde{A}][f_b] \quad [\tilde{A}] = \frac{1}{2R_3} \{B\} \{B\}^T [A_0]$$

したがって各次振動応答に対するパワースペクトル密度関数は

$$[S_{yy}(\omega)] = [H(\omega)][S_{ff}(\omega)][H(\omega)^*] \quad (8)$$

と表される。ただし、

$$[H(\omega)] = [[\tilde{\omega}_j^2] - \omega^2[a_0] + i\omega[\tilde{2\omega_j\beta_j}]]^{-1}$$

ここで $[H(\omega)^*]$ は周波数応答関数 $[H(\omega)]$ の共役関数である。式(8)より各次振動応答のパワースペクトルが得られると、フーリエ逆変換により二乗平均応答を求めることができる。さらにモーダルマトリックス $[\Phi]$ および $[\Psi]$ を用いてこれらの応答の変換を行うと各節点の応答を求めることができる。

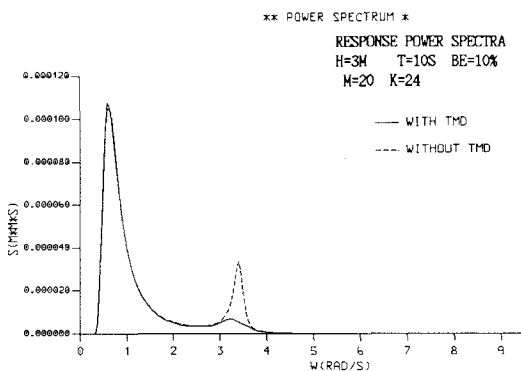


図-3 応答のパワースペクトル密度関数

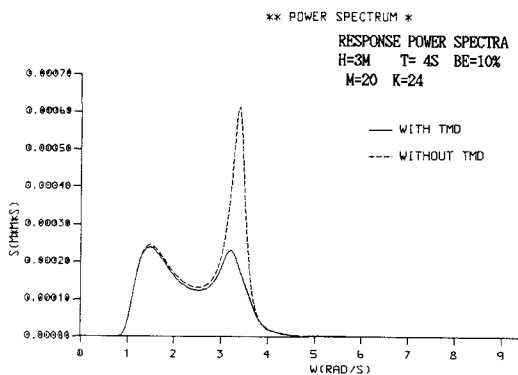


図-4 応答のパワースペクトル密度関数

3. 解析結果とその検討

図-1 は解析モデルを示したものであり、構造物の高さは120m、水深は110mである。最上部にTMDがあり、主要部材の直径は2.0mで、その厚さは20mmである。各基礎は杭基礎で支持されており地盤のせん断波速度は100m/sである。構造物の振動は面内であり、各節点の変位は水平、鉛直及び回転の3成分からなり、上部構造物の1次振動の減衰定数は2%としている。基礎との動的相互作用を考慮した全体系の固有振動数(固有周期)は1次が3.24rad/s(1.93s)、2次が3.61rad/s(1.74s)であり、平均波高5mで平均周期が6秒の波力を受けるときそれぞれの減衰定数は3.8%及び0.5%である。式(7)による応答解析では等価線形化法による抗力項の線形化を行っているが、ここでは2回程度の繰返しを行っている。

図-2 は海面の動きを表すブ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り、平均波高と平均周期によって異なった形となる。平均周期が長くなるに従ってパワースペクトルのピーク値は増加し、本解析モデルではその固有周期から離れることが分かる。構造物の応答を支配する振動数域は波力のパワースペクトルのピーク値の振動数域から離れるため平均周期が長くなっても必ずしも構造物の応答は増加しないものと思われる。

図-3 は平均波高3m、平均周期10秒の波力が作用する場合、構造物の節点1の水平変位応答のパワースペクトルを示したものである。実線はTMDがない場合であり、破線はTMDの質量が20ton(これは海水による付加質量を含め構造物全体の質量の1%に相当する)で減衰が10%の場合をそれぞれ示している。応答のパワースペクトルは2つのピークを有しており、その1つは波力の卓越周期によるものであり、他のピークは構造物の1次振動にともなうものである。TMDの振動により構造物の1次振動における応答が低減されることが分か

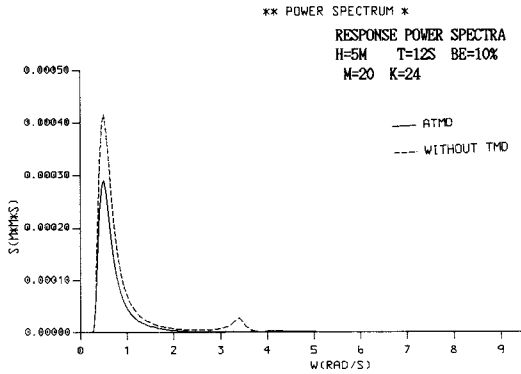


図-5 応答のパワースペクトル密度関数

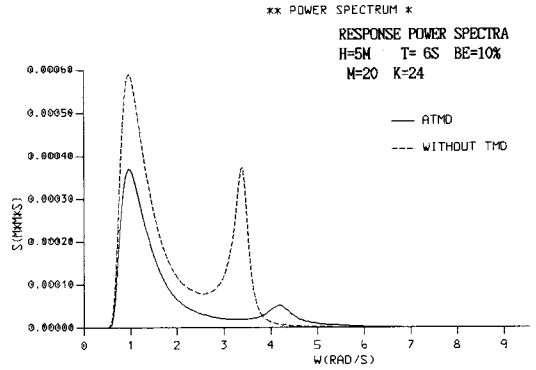


図-6 応答のパワースペクトル密度関数

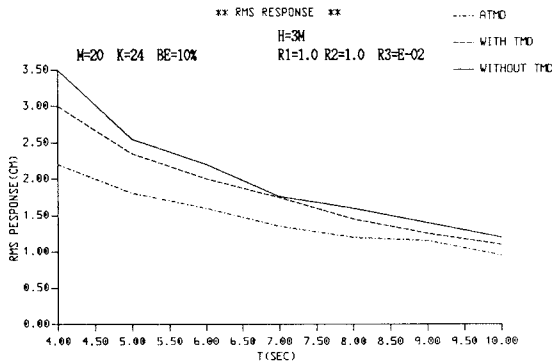


図-7 応答に及ぼす制振の影響

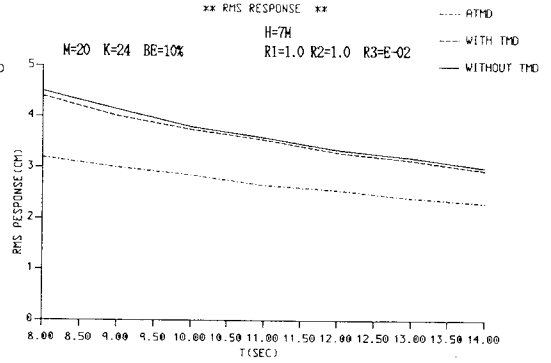


図-8 応答に及ぼす制振の影響

る。それぞれの場合の rms 応答を求めると、TMD が無い場合は 1.4cm であり、TMD がある場合は 1.2cm である。波力の平均周期が長くなり、その応答が波力の卓越周期に支配されようになると、TMD の影響は小さくなることが分かる。

図-4 は平均波高 3m、平均周期 4 秒の波力に対する節点 1 の水平変位応答のパワースペクトルを示したものである。TMD の条件は前の場合と同じであり、実線は TMD が無い場合の応答を示しており、破線は TMD がある場合の応答をそれぞれ示している。波力の平均周期が短くなり構造物の 1 次振動に近づくと、この構造物の 1 次振動での応答が大きな影響を与えることが分かる。したがって、TMD の振動に対応した応答は低減できるが、波力のような卓越周期の長い外力に対しては十分な応答の低減が得られないことが分かる。このため TMD のみによる制振に加えてアクティブな外力を作用させた場合について検討を加えることにする。

図-5 は平均周期が 12 秒、平均波高が 5m の波力を受けるとき、TMD に制振力を加えた場合の変位応答のパワースペクトルを示したものである。破線は TMD が無い場合の応答であり、実線は制振力に対する重みが 10^{-2} のときの応答を示している。波力の平均周期は構造物の固有周期に比べて長いため、応答は波力の卓越周期に支配されているが、制振力により応答が低減されることが分かる。

図-6 は平均周期 6 秒、平均波高 5m の波力に対する応答のパワースペクトルを示したものである。破線は TMD が無い場合の応答であり、実線は制振力を受ける場合の応答で、その重みは 10^{-2} を用いている。応答は波力の平均周期と構造物の 1 次振動数で大きなピークを有しているが、TMD に制振力を加えることにより応答は低減されることが分かる。以上の結果から分かるように波力に対する応答は TMD を設けることによって低減できるが、この効果は構造物の 1 次振動数に対するものである。他方、TMD に制振力を加えると、波力の平均周期に支配される振動数での応答も低減することができ、効果的に制振を行うことができるものと思われる。

図-7 は波力の平均波高が 3m で平均周期が 4 秒から 10 秒の間にある場合の節点 1 の水平変位の rms 応答値

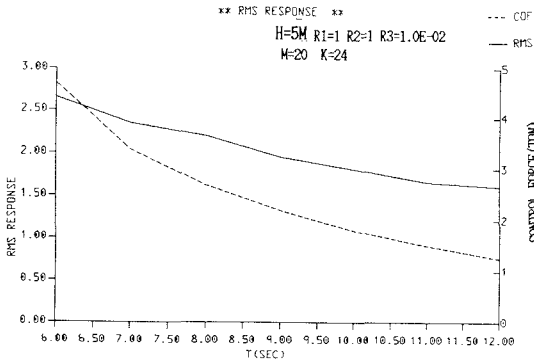


図-9 平均周期による制振力の変化

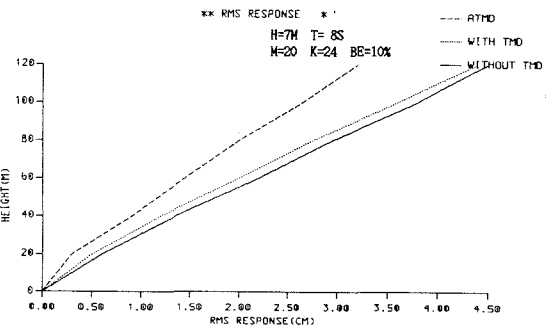


図-10 全体系の変位応答に及ぼす制振の影響

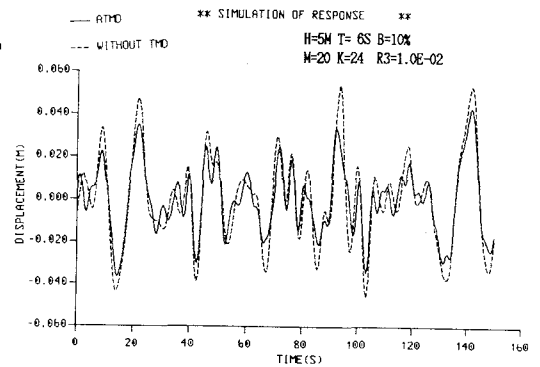
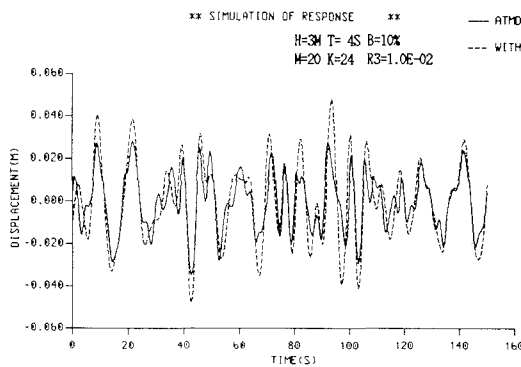


図-11 時刻歴応答(節点1)

を示したものである。実線と破線はそれぞれTMDの有無に対する応答を示しており、一点鎖線はさらにTMDに制振力を加えた場合の応答を示している。波力の平均周期が短いほど、応答が大きくなり、TMDおよび制振力を加えた場合とも、応答の低減効果が大きくなっていることが分かる。これは波力の平均周期が短くなる程、構造物の1次振動数の影響を大きく受けるためであり、これまで示した応答のパワースペクトルからも分かるように制振効果が大きくなる。一方、波力の平均周期が長くなるとその卓越周期による応答が支配的となるため制振効果が減少することが分かる。

図-8は同様に波力の平均波高7mで、平均周期が8秒から14秒の間にある場合の節点1の水平変位のrms応答値を示したものである。TMDの有無に対する応答は波力の平均周期の変化にかかわらず大きな相違は見られない。一方、TMDに制振力を加えると、どの平均周期に対しても変位応答は低減されており制振効果が示されている。特に平均周期が8秒のとき、応答は約30%減少していることが分かる。

図-9は波力の平均波高が5mのとき、平均周期が6秒から12秒の間にある場合の節点1の水平変位のrms応答値と制振力の大きさを示したものである。実線はrms変位応答であり、破線は制振力を表している。この場合の制振力に対する重み係数は 10^{-2} である。波力の平均周期が短いとき制振の影響が大きくなるが、一般にこれに対応して制振力も増加することを示している。波力の平均周期が6秒のとき制振力は約4.5tonであり、平均周期が12秒のとき約1.2tonとなっている。波力の作用する時間は非常に長いため、TMDに比較的小さな制振力を加えることにより構造物の応答を効果的に制振できることは、海洋構造物の制振を考える上で有用なものと思われる。

図-10は平均波高7m、平均周期8秒の波力に対する構造物全体の応答を示したものである。実線はTMDがない場合であり、点線はTMDがある場合の応答を示している。また破線はTMDに制振力を加えた場合の応答を示している。波力の平均周期が構造物の固有周期と大きく離れるため、応答は波力の平均周期の影響が大き

くなっている。このため TMD のみによる応答の低減は少なく、TMD に制振力を加えることによって約 30% の応答の低減効果があることが分かる。

図-11 は平均波高 3m で平均周期が 4 秒と、平均波高 5m で平均周期が 6 秒の波力を受ける場合の節点 1 の水位変位の時刻歴応答を示したものである。これらの応答は先に求めた応答のパワースペクトルを利用したシュミレーションによって求めたものである。破線は TMD がいない場合の応答であり、実線は TMD に制振力を加えた場合の応答を示している。いずれの場合も波力の卓越周期による応答と構造物の固有周期による応答から形成されていることが分かる。制振力を加えることによって応答は低減されており、比較的小さな制振力による応答の低減を示している。

4. あとがき

波力を受ける海洋構造物の動的応答解析に及ぼす TMD の影響について検討を加えた。本解析による結果を要約すると次のようになる。

1. 波力の平均周期が構造物の固有周期に接近するとき、その動的応答は固有周期の影響を強く受ける。したがって、この固有周期に同調するような TMD 系によって、その応答は低減することができる。
2. 波力の平均周期が長くなり構造物の固有周期から十分離れると、これらの二つの周期に対応した応答の中で、波力の平均周期による応答が支配的となる。特に波力の平均周期に対応した応答は TMD のみでは十分な制振ができないと思われる。
3. 制振力を加えることによって波力を受ける構造物の応答は低減される。特に波力の平均周期が長くなり、それによる応答が卓越するとき、TMD に比較的小さな力を加えることにより制振が可能となる。
4. 海洋構造物に作用する波力の平均周期は一定ではないので、構造物の応答は TMD にアクティブな制振力を加えることにより効果的な制振ができる。さらに異なる固有周期を有する構造物や波高に対して、制振力の大きさや、その影響について検討することが必要であると思われる。

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) 山田善一, 家村浩和, K.Venkataramana, 河野健二, '波力と地震力を受ける海洋構造物の動的応答解析' 構造工学論文集, Vol.34A, pp.851-859, 1989
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) Y. Yamada, H. Iemura, K. Izuno, Y.Iwashaki and S. Ohno, 'Phase-delayed active control of structures with identification of random earthquake ground motions', 第 8 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1917-1922, 1990

(1991 年 9 月 30 日受付)