

(1) TMD を有する海洋構造物の動的応答解析

DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS OF OFFSHORE STRUCTURE WITH TMD

河野健二*¹ 古川浩平**²

Kenji KAWANO, Kohei FURUKAWA

Dynamic response of offshore platform with TMD 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 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 reduced using TMD system, its effects are very sensitive to the mass and damping of TMD system.

Key words: Offshore structure, Dynamic response, TMD, passive active control

1. まえがき

海洋構造物の設計において考慮される動的外力としては、波力、地震力等がある。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、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、TMDが動的応答に及ぼす影響について検討を加えた。さらにアクティブな制振力を有する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。Fig.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事ができる。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事ができる。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⁾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、

$$[K_m] = [\rho(C_M - 1)V\backslash] \quad [K_M] = [\rho C_M V\backslash]$$

* 工博 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木開発工学科

** 工博 山口大学教授 工学部土木工学科

$$[\bar{K}_D] = \left[\sqrt{\frac{8}{\pi}} \rho C_D \frac{A}{2} \sigma_{r, \setminus} \right] \quad \{\tau\} = \{v - \dot{x}\}$$

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。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⁾

2.2 制振力の評価法

制振力を受ける海洋構造物の運動方程式は式(1)で表されるが、この系の固有振動数は低次振動モードにおいては十分離れており、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⁾ したがって、全体系の運動方程式の最終的な形は固有値解析を適用すると

$$\{f_*\} = \{\ddot{y}\} + \left[\sqrt{2\beta_j \omega_j} \setminus \right] \{\dot{y}\} + \left[\sqrt{\omega_j^2} \setminus \right] \{y\} - [f_1]\{\dot{v}_a\} - [f_2]\{v_a\} - \{B\}u = \{0\} \quad (2)$$

と表される。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)}

$$Q = \{\dot{y}\}^T [R_1] \{\dot{y}\} + \{y\} [R_2] \{y\} + u^2 [R_3] + \{\lambda\}^T \{f_*\} \quad (3)$$

ただし、 $[R_1], [R_2], [R_3]$ はそれぞれの重み係数であり、 λ 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 λ が決定され、制振力 u が決定される。すなわち、

$$\frac{\partial Q}{\partial \{\dot{y}\}} = 0 \quad \frac{\partial Q}{\partial \{y\}} = 0 \quad \frac{\partial Q}{\partial u} = 0 \quad \frac{\partial Q}{\partial \{\lambda\}} = 0 \quad (4)$$

これより制振力は

$$u = \frac{1}{2R_3} \{B\}^T [A_0] (\{\ddot{y}\} - [f_1]\{\dot{v}_a\} - [f_2]\{v_a\}) \quad (5)$$

と表される。ただし、

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

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(2)、式(5)から

$$[a_0]\{\ddot{y}\} + \left[\sqrt{2\beta_j \omega_j} \setminus \right] \{\dot{y}\} + \left[\sqrt{\omega^2} \setminus \right] \{y\} = [\bar{f}_1]\{\dot{v}_a\} + [\bar{f}_2]\{v_a\} \quad (6)$$

と表される。ただし、

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

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

$$[S_{yy}(\omega)] = [H(\omega)][S_{ff}(\omega)][H(\omega)^*] \quad (7)$$

と表される。ただし、

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

ここで $[H(\omega)^*]$ は周波数応答関数 $[H(\omega)]$ の共役関数である。式(7)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。

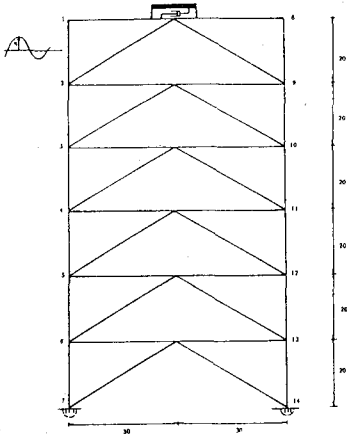


Fig.1 TMDを持つ海洋構造物の解析モデル

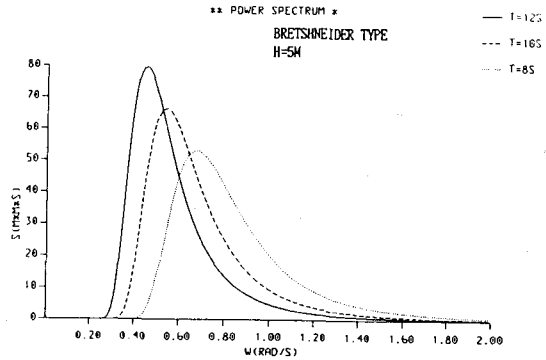


Fig.2 波のパワースペクトル密度関数

3. 解析結果とその検討

Fig.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25mm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5.21rad/s(1.21s)、2次が16.65rad/s(0.377s)であり、それぞれの減衰定数は1.8%及び5.6%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回程度の繰り返しを行っている。

Fig.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と思われる。

Fig.3(a)は平均波高5m、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。点線はTMDがない場合であり、実線は制振力を受けるTMDが5%の減衰を有する場合をそれぞれ示している。TMDの振動により構造物の応答が低減されることが分かる。またFig.3(b)はこの場合の制振力のパワースペクトルを示している。TMDの振動により構造物の応答が低減される振動数域で制振力のパワースペクトルは大きな値を示していることが分かる。これらの結果からそれぞれの場合のrms応答を求めると、TMDがない場合は19cmであり、TMDがある場合は15cmである。またこの場合の制振力は11.3tonである。そこで、さらに制振効果のあるTMD系について検討を加える。

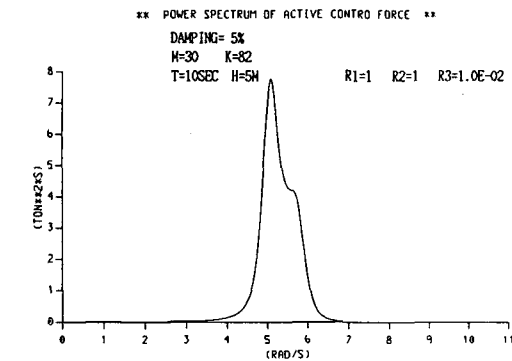
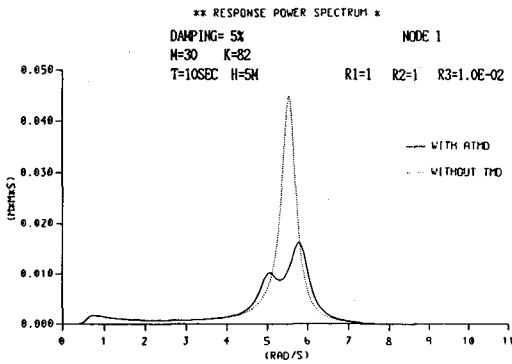


Fig.3 応答のパワースペクトル密度関数 (1TMD)

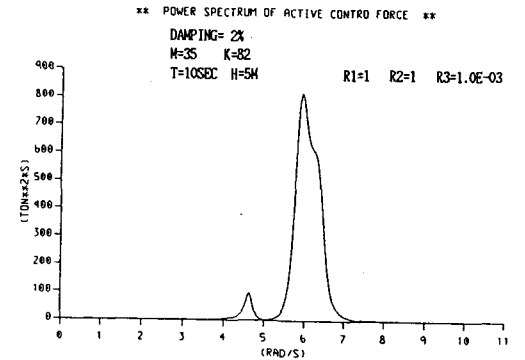
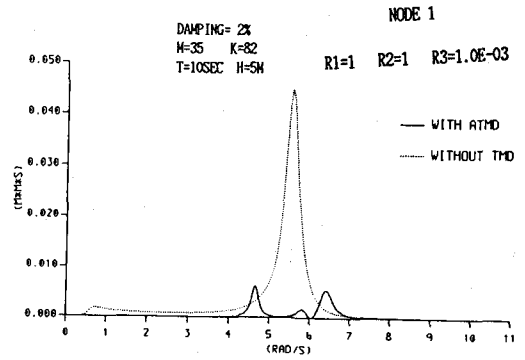


Fig.4 応答のパワースペクトル密度関数 (2TMD)

Fig.4(1) は2つのTMDを有する場合の節点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。波力の条件は前の場合と同じであり、実線がこの場合の応答を示している。2つのTMDの内、1つのTMDのみが制振力を受ける構造となっており、構造系の1次振動における影響が大きく抑えられることが分かる。この場合のTMDの減衰定数は2%としている。またFig.4(b)は制振力のパワースペクトルを示したものであり、構造物の振動を抑えるため大きな力を要していることが分かる。この場合のrms変位応答は8.3cmであり、制振力は17tonである。

Fig.5は2つのTMDを有する系について、制振力を受けるTMDの質量の変化が応答に及ぼす影響を示したものである。横軸はこのTMDの質量を表しており、縦軸は左側が節点1の水平変位に対するrms応答を、右側はその時の制振力を表している。ここで実線はrms変位応答であり、点線はこの場合TMDに加える制振力の大きさを表している。このTMDの質量は構造物の1次の固有振動に同調するような値であるが、この質量によって応答の制振効果が大きく変化することが分かる。TMDの質量の変化の刻みが大きいため、変位応答を最小にするようなTMDの質量の値は決定できないが、その効果は多くのパラメータに依存していることが分かる。

Fig.6は2つのTMDを有する系についてTMDの減衰の変化が応答に及ぼす影響について示したものである。横軸は減衰定数の大きさを、縦軸は節点1のrms応答とTMDに加える制振力を表している。TMDの減衰が増加すると、構造物の応答は減少し、同時に制振力も減少することが分かる。TMDの減衰を調整し、その値を約10%に設定することができれば、より効果的な制振を期待することができると思われる。

Fig.7は平均波高5m、平均周期10秒の波力に対して、TMDの有無が構造物全体(節点1から節点7)の変位応答に及ぼす影響を示したものである。実線はTMDがない場合のrms応答であり、点線及び破線の応答はTMDの減衰が2%、10%に変化する場合を表している。TMDに作用する制振力の重みは 10^{-3} を用いている。TMDに適切な減衰を作用させることによって各節点の応答は大幅に低減されることが分かる。一方、Fig.8は同様の入力条件のとき、構造物全体系の応答に及ぼすTMDに作用する制振力の大きさの影響を示したものである。TMD

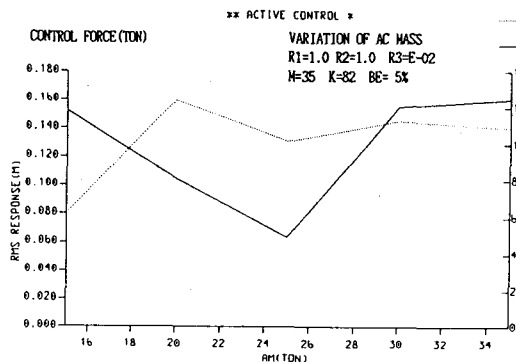


Fig.5 応答に及ぼすTMDの質量の影響

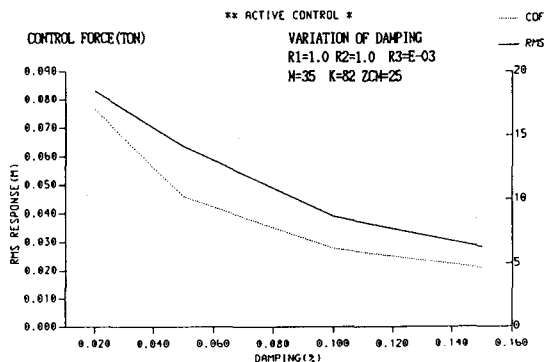


Fig.6 応答に及ぼすTMDの減衰の影響

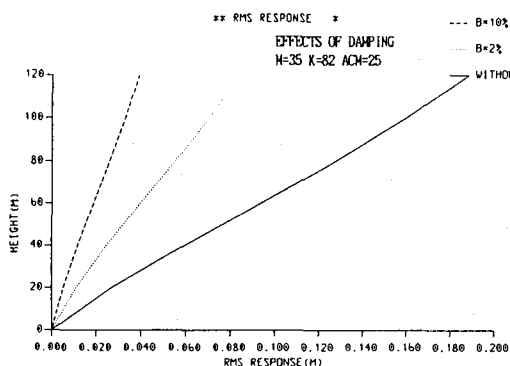


Fig.7 全体の変位応答(減衰の影響)

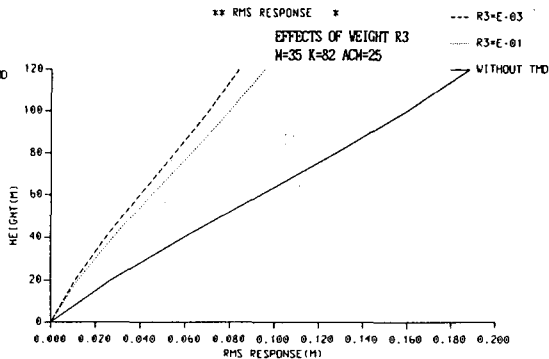


Fig.8 全体系の変位応答(制振力の重みの影響)

の減衰は5%であり、制振力の重みはそれぞれ 10^{-1} 、 10^{-3} の場合の応答を示している。TMD に作用する制振力の重みが変わっても応答に及ぼす影響は小さく、TMD の減衰の方がより大きな影響を及ぼすことが分かる。

Fig.9 は TMD に加える制振力の重み係数が構造物の応答に及ぼす影響を示したものである。横軸は制振力の重み係数の値であり、縦軸は節点 1 の rms 応答と制振力を表している。制振力に対する重み係数が減少し他の重み係数との相違が大きくなるにつれて、rms 応答は減少するものの、その変化は小さいことが分かる。これに対応した制振力は大きく増加しているが、変位応答への影響は小さい事が分かる。このように構造物が波力を受けるとき TMD による制振では、制振力の増加だけでは十分な応答の低減は期待できず、適切な TMD の質量や減衰の設定が重要であることが分かる。

Fig.10 は 2 つの TMD を有する系について平均波高 5m のとき、異なる平均周期に対する応答を示したものである。横軸は入力波の平均周期を縦軸は節点 1 の rms 変位応答とそれに対応した制振力を示している。平均周期の増加に従って応答は減少しており、同時に制振力も減少している。これは入力波の卓越振動数が Fig.2 に示したように約 0.5 rad/s であるのに対し、構造物の応答は Fig.4(a) から分かるように約 5 rad/s であり、両方の卓越振動数が離れていることによるものと思われる。このように波力を受ける構造物に対して TMD による制振を行う場合、特に TMD の質量や減衰の設定の影響が大きいことが分かる。

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

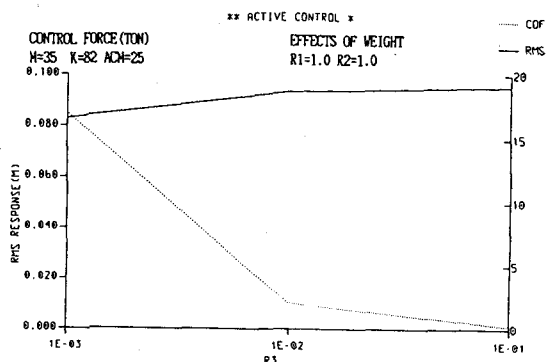


Fig.9 応答に及ぼす制振力の重みの影響

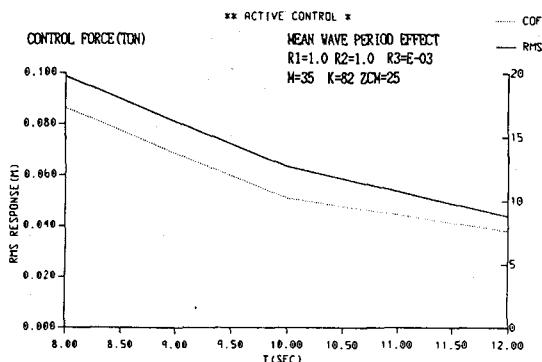


Fig.10 応答に及ぼす平均周期の影響

要約すると次のようになる。

1. 波力を受ける海洋構造物の動的応答は1次振動の影響を強く受ける。したがって、この1次振動に同調するようなTMD系によって、その応答は低減することができる。
2. TMDが波力を受ける海洋構造物の応答に及ぼす影響は、TMDの質量や減衰によって大きく異なってくる。したがって、このような値の適切な設定により、さらに効果的な制振が可能になるものと思われる。
3. TMDに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が、制振力の変化に伴ってTMDの同調による効果が減少することもあり、その影響についてはさらに検討する必要がある。
4. 波力と構造物のそれぞれの卓越周期が十分に離れるため、振動モード間の連成や波力の平均周期や平均波高がTMDによる振動に及ぼす影響は小さいことが分かる。

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