

可変減衰機能を有するセミアクティブ同調質量ダンパーによる振動制御

Hitz 日立造船㈱ 正会員 畠中 章秀 正会員 北村 幸嗣 正会員 ○生田 目尚美

1. 概要

構造物の制振対策として、同調質量ダンパー（Tuned Mass Damper, 略称「TMD」）を用いるケースが多い。TMDはいわゆる「パッシブ制御」と呼ばれる制振手法で、より高い制振効果を得るためにTMDの固有振動数とTMD減衰比を最適値に調整する必要があり¹⁾、その制振効果にもおのずと限界が生じる。一方、TMDの限界を克服するために、その構成要素であるバネ剛性や減衰力を時々刻々変化させることによってより高い制振効果を得る「セミアクティブTMD」の開発も進められている^{2)~4)}。著者らはMRダンパーの適用を念頭に置いて⁵⁾、減衰力を可変とするセミアクティブTMD（以下、「SATMD」と称す）の研究を実施した。本論文では、可変減衰機能を有するSATMDの制御法を示すとともに、その効果を数値シミュレーションにより検証した。

2. 可変減衰機能を有するセミアクティブTMD（SATMD）の制御法

(1) 振動モデルと運動方程式 対象構造物（斜張橋の架設時主塔と仮定）の振動諸元を表1のように定めた。図1にSATMDの振動モデルを示す。また、この振動系に対する運動方程式を式(1)に示す。なお、制御力を $u=0$ とするとTMD（パッシブ制御）となる。

$$\begin{aligned} \text{運動方程式} \quad & \left\{ \begin{array}{l} m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = F - m_D (\ddot{x}_s + \ddot{x}_D) \\ m_D (\ddot{x}_s + \ddot{x}_D) + c_D \dot{x}_D + k_D x_D = u \end{array} \right. \dots \dots (1) \end{aligned}$$

x_s : 構造物変位, x_D : 構造物とTMDの相対変位, m_s : 構造物の質量, c_s : 構造物の減衰係数, k_s : 構造物のばね定数, m_D : TMDの質量, c_D : TMDの減衰係数, k_D : TMDのばね定数, F : 外力, u : 可変減衰ダンパーによる制御力

(2) 制御法 まず、TMD（パッシブ制御、質量比 $\mu=0.01$ ）の自由振動に対する複素固有値解析について説明する。式(1)の外力および制御力の項をゼロとし、さらに、簡単のために、構造物の減衰比をゼロとした場合の複素固有値解析結果を図2に示す。各々TMD減衰比に対するモード振動数およびモード減衰比の関係を示す。モード減衰比の変化に着目すると、TMD減衰比がある程度以上の値になると、高減衰モードと低減衰モードに分岐することがわかる。時間経過とともに、低減衰モードのみが残ることを考えると、2つのモード減衰比をともに最大とすることが最適化条件と言える。もし、2つのモード減衰比に分岐する領域において高減衰モードのみを励起するようにセミアクティブ制御力を与えることができれば、SATMDはTMDよりも制振効果が高くなると考えられる⁶⁾。本研究では、複素固有値解析で得られる低減衰モードの極（複素固有値の実部と虚部）を高減衰モードの極に等しくなるように指定し、その極配置を実現するための状態フィードバックゲインをロバスト極配置法⁷⁾により計算した。制御力は系の状態量（ここでは、 $[x_s, \dot{x}_s, x_D, \dot{x}_D]$ ^t）にフィードバックゲインを乗じることで計算される。また、本SATMDの場合、制御力 u は減衰力のみが作用可能なので、式(2)で与えられる条件において制御力が実現されるものとした。

$$u = u_{\text{opt}} (u \cdot \dot{x}_D < 0), \quad u = 0 (u \cdot \dot{x}_D \geq 0) \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots (2)$$

u_{opt} : 極配置法により計算される制御力（フルアクティブ制御力）

表1 対象構造物の振動諸元

構造物一般化質量 m_s	4720 ton
構造物固有振動数 f_s	0.1752 Hz
減衰比 ξ_s	0.005

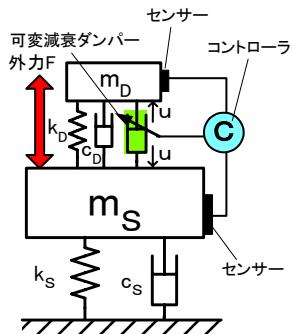
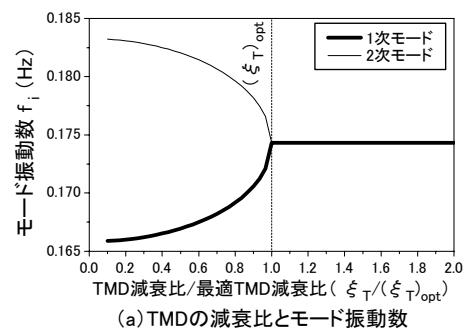
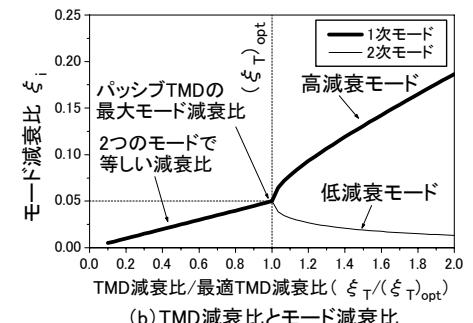


図1 SATMDの振動モデル



(a) TMDの減衰比とモード振動数



(b) TMD減衰比とモード減衰比

図2 複素固有値解析結果

キーワード セミアクティブ制御、同調質量ダンパー、可変減衰ダンパー、制振、極配置法

連絡先 〒550-0002 大阪市西区江戸堀2-6-33 Hitz日立造船株式会社 TEL 06-6447-6054

3. 数値シミュレーションによる制振効果の検証

自由振動に対する SATMD の制振効果を数値シミュレーションにより検討した。表 2 に本研究で想定した TMD の振動諸元を示す。質量比 μ を 0.01 とし、TMD の固有振動数は自由振動に対する最適値¹⁾を与えた。また、TMD の減衰比 ξ_T については、TMD の最適減衰比(ξ_T)_{opt}の 1/5 とした。

セミアクティブ制御力 u を発揮させるために指定する高減衰モードの極を 4 種類選び、それぞれの場合の減衰自由振動を計算した。極は最適減衰(ξ_T)_{opt}の 1.2~2.0 倍の間で選定した。解析結果として、図 3 に応答の包絡線を示す。比較のために、制御力をゼロとした場合 (TMD の減衰比は(ξ_T)_{opt}/5)、最適減衰比を与えた場合および最適減衰の 2 倍の減衰比を与えた場合の TMD に対する結果も併記する。また、参考のために ATMD (フルアクティブ制御) の結果も併記する。図より、SATMD とした場合には、最適な TMD よりも高い減衰効果が得られている。また、指定する極の違いをみると、(ξ_T)_{opt}に対する倍率を大きくすると減衰効果が高くなる傾向にあることがわかる。

図 4 は 1.8 (ξ_T)_{opt} の高減衰モードの極を指定した SATMD について、構造物の変位、相対変位および制御力の時系列を示したものである。図 4 より、制御力は約 20 秒付近までは断続的にしか発生しておらず、その間では構造物の変位と相対変位は、(ξ_T)_{opt}/5 の TMD の応答とほぼ等しくなっている。一方、20 秒以後は制御力が発生し、応答が急激に減衰している。20 秒まではうなりを伴う TMD の応答をトレースしたことから、文献 6) で指摘しているように、うなりにより構造物のエネルギーが TMD に移行し、TMD に移行したエネルギーを高減衰モードに切り替えることで効率的に消費していると解釈できる。

次に、そのうなりの影響を見るために、TMD 減衰比を最適減衰の 1/4, 1/3, 1/2, 1/1.25 と変化させた場合の減衰自由振動を計算した。なお、高減衰モードの極は 1.8(ξ_T)_{opt}を指定している。応答包絡線を図 5 に示す。図 5 より、減衰比 ξ_T が大きくなるに従い減衰効果が小さくなっている。減衰比 ξ_T が大きくなるに従い、うなりの影響が小さくなることから、適度にうなりを生じさせることも SATMD による制振には重要と考える。

4. まとめ

極配置法に基づく SATMD の制御法を示すとともに、その効果を数値シミュレーションにより検証した。その結果、SATMD とすることで最適な TMD (パッシブ制御) よりも制振効果が高くなることが分かった。今後は調和外力や不規則外力に対する効果、MR ダンパーカーをモデル化して制御力を発揮させた場合の効果、TMD の固有振動数が最適チューニングされない時のロバスト性などを検討する予定である。

参考文献

- 1) 山口, 共立出版, 1996, 2) D. Hrovat et al., J Eng Mech, ASCE 1983, 109(3), 3) S. Nagarajaiah & N. Varadarajan, Proc. 13 Eng Mech Conf., 2000,
- 4) S.K. Yalla & A. Kareem, J. Structural Eng., ASCE 2003, 129(7), 5) 北村ほか, 第 7 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集 2004, 6) 木村・阿部・藤野, 構造工学論文集 Vol.43A, 1997, 7) 野波・西村, 東京電機大学出版局, 1998

表 2 TMD の振動諸元(質量比 $\mu = 0.01$)	
同調比 γ_{opt}	0.990
TMD 減衰比 $(\xi_T)_{opt}/5$	0.0199
TMD 振動数 f_d (Hz)	0.173
TMD 質量 m_d (ton)	47.20

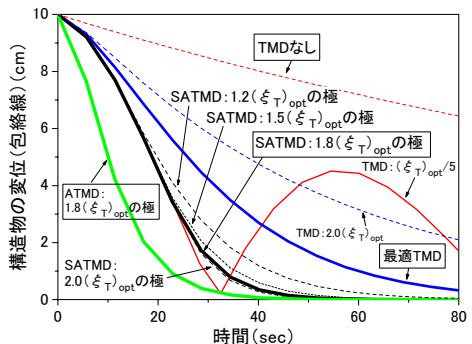


図 3 減衰自由振動の応答包絡線
(TMD, SATMD, ATMD の比較)

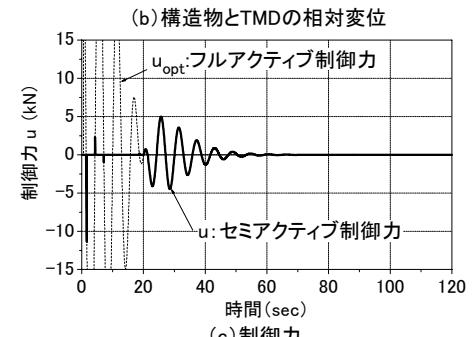
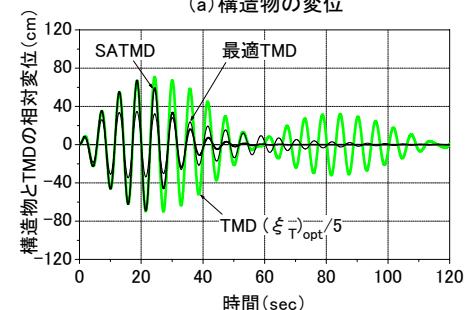
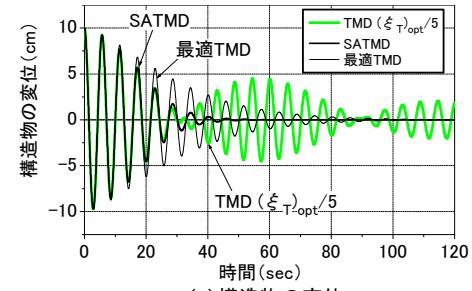


図 4 応答波形(SATMD, TMD)

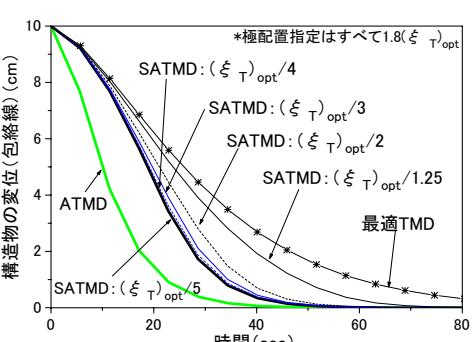


図 5 減衰自由振動の応答包絡線
(TMD 減衰比を変化させた結果)