

可変オリフィスを利用した セミアクティブ同調液柱管ダンパーの制御則

Control laws for semi-active tuned liquid column dampers with variable orifice openings.

木村周二*, 阿部雅人**, 藤野陽三***

Shuji KIMURA, Masato ABE and Yozo FUJINO

*東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻修士課程 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)

**Ph.D 東京大学講師 工学系研究科社会基盤工学専攻 (同上)

*** Ph.D 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻 (同上)

Tuned Liquid Column Damper (TLCD) is a compact device which is effective in reducing structural vibrations. The optimum orifice opening of the TLCD depends on the level of excitation force because the head loss provided by the orifice is nonlinear. To eliminate this amplitude dependency of performance and to enhance the performance of passive TLCDs, a semi-active TLCD whose orifice opening is adjustable is proposed. Two semi-active control strategies are constructed based on the analytical perturbation solution of modes. It is demonstrated that these laws are effective in eliminating amplitude dependency but is not effective in improving robustness to off-tuning of the natural frequency.

Key Words: semi-active control, tuned liquid column damper, perturbation solutions, variable orifice

1. はじめに

建設系構造物の振動を制御するにあたっては、パッシブ制振策が数多く用いられている。また、パッシブ制振では制振性能に限界があるため、何らかの制御力を外部から導入することによって、さらに高い性能を実現するアクティブ制振が提案され、すでに幾つかの実用例が見られる¹⁾。しかしながら、アクティブ制振は外部より制御力を導入することから信頼性やコストの面でいまだ解決すべき課題は多い。そこで、減衰や剛性などの構造特性を変化させることで、より小さいエネルギーで振動を効率よく制御することを目指すセミアクティブ制振への関心が高まりつつある²⁾。しかし、セミアクティブ制振は構造特性を変化させる方法であるから、システムが非線形の時変系となることが多く、通常の線形制御理論では制御則の構築が一般に困難である。

一方、制振に最もよく用いられる手法の一つに、同調質量ダンパー (TMD) や同調液体ダンパー (TLD)、あるいは本論文で取り上げる同調液柱管ダンパー (TLCD) などのように、制御対象の構造物の固有振動数に付加質量を同調させることによって構造物の振動を吸収する同調系ダンパーがある¹⁾。同調系ダンパーは、構造物の

質量の1%程度の比較的少ない質量で制振効果があることや、構造物の完成後の導入も可能であることなどの利点を有しており、主に風による振動が問題となった架設中の橋梁主塔やタワー状構造物、橋桁などの制振に幅広く用いられている¹⁾。同調系ダンパーの一種であるTLCDは、図-1のようなU字管内の液体 (通常水) の同様を利用したダンパーである³⁾。

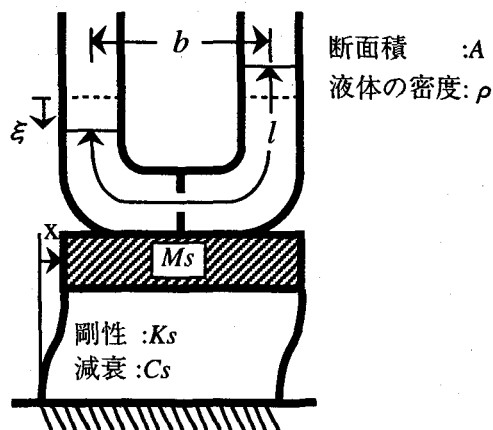


図-1 TLCD模式図

TLCDは、TMDと比較して、構造が簡単で安価であること、液体の量を調節することによって容易に固有周期の調整ができること、容器と水の摩擦が小さいため小振幅の振動にも制振効果を発揮できることなどの多くの利点を有している。しかし、水の比重が小さいためTMDに比べて装置が大きくなりがちなことや、オリフィスでの水頭損失による非線形性のため制振性能が振幅に依存することなどの欠点がある。また、同調系ダンパーは一般に、定常的な外力に対しては高い制振効果を発揮するが、非定常性が強い外力に対しては効果が低いこと、同調の誤差に敏感であり最適同調比をはずれると効果が低くなることなどの問題も有している。

そこで、本論文では、これらの欠点を改善し制振性能を高めるため、オリフィスの開口率を制御することによって減衰を調節するセミアクティブTLCDを検討する。しかし、振動中に減衰を調節するセミアクティブ制振系は、もとより非線形であり、さらに、TLCDのオリフィスの水頭損失も非線形であることから、制御則の構築が困難である。そこで、等価線形化した運動方程式に摂動解析を適用して求めたモード特性の解析解を基に、自由振動応答における系の減衰を最大にする制御則を構築した。この方法は、文献4において線形のTMDを対象に考案されたものを発展させたものである。なお、ここで取り上げている可変オリフィスTLCDの構成自体は文献5で提案されているものであるが、本研究においては、オリフィス開口率の変化を流速が0であるときに限ることによりオリフィスと液体の動的相互作用の影響を最小化していることや、上に述べた制御則の構築方法に独自性があると考えている。

本論文の構成は以下の通りである。最初に、数値シミュレーションによってパッシブTLCDの特性を整理し、その限界を明らかにする。次いで、モード特性の摂動解を導き、それに基づいて2つの制御則の構築を行う。最後に、その制振効果を数値シミュレーションによって検証する。

なお、同調系ダンパーを、近接した固有周期を持たない構造物に対して設計する際には、制振対象モードのモード形をダンパーの設置位置で正規化した1自由度として近似できることが知られている⁶⁾。そこで、ここでの解析では構造物を1自由度系として検討を行った。

2. パッシブTLCD

ここでは、数値シミュレーションによって、パッシブTLCDの特性を把握し、その限界や問題点を明らかにする。

2.1 パッシブTLCDの運動方程式

TLCDを水平方向に加振した時の、管内の液体の運動方程式は、液体を非圧縮非粘性と仮定すれば、管軸方向の1自由度として、次のように表される³⁾。

$$\rho A l \ddot{\xi} + \frac{1}{2} \rho A \kappa \left| \dot{\xi} \right| \dot{\xi} + 2 \rho A g \xi = -\rho A b \ddot{z}(t) \quad (1)$$

ここで、 ξ ：静水時からの液面の変位、 A ：管の断面積、 ρ ：液体の密度、 l ：液柱の長さ、 κ ：オリフィスの水頭損失係数、 g ：重力加速度、 b ：液柱管の幅、 $\ddot{z}(t)$ ：TLCDの設置されている場所の水平方向の加速度、である。水頭損失係数 κ は、オリフィスの水頭損失の量を表す係数で、オリフィスの開口率によって変化する。開口率が大きいオリフィスは水頭損失が小さいので、開口率と κ には、逆比例的な関係がある。 κ とオリフィスの開口率の関係は、管の形状および管径によって変化する⁷⁾、 κ と開口率の関係は、断面ごとに実験的に求める必要がある。なお、本論文では、この開口率と κ の関係はすでに知られているものとして、直接 κ を開口率を表す変数として扱っている。なお、この κ を含む式(1)の左辺の水頭損失項が速度の2乗に比例するため、運動方程式は非線形となる。

図-1のようにTLCDと1自由度の構造物が連成した系の運動方程式は、式(1)の関係をを用いることによって、

$$\begin{bmatrix} M_s + \rho A l & \rho A b \\ \rho A b & \rho A l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\xi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \rho A \kappa \left| \dot{\xi} \right| \dot{\xi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & 2 \rho A g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \xi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

と表せる³⁾。ここで、 x ：構造物の変位、 M_s ：構造物のモード質量、 C_s ：構造物のモード減衰、 K_s ：構造物のモード剛性、 $f(t)$ ：外力、である。さらに、表-1に示す無次元パラメータを導入すると、式(2)は、以下のよう書き直すことができる。

$$\begin{bmatrix} 1 + \mu & \mu r \\ r & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\xi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2 \omega_s \zeta_s & 0 \\ 0 & \frac{1}{4g} \omega_r^2 \kappa \left| \dot{\xi} \right| \dot{\xi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_s^2 & 0 \\ 0 & \omega_r^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \xi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f(t)}{M_s} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 r で表されるTLCDの有効質量比とは、 $\rho A b$ と

表-1 構造物及びTLCDの
無次元パラメータ

$\mu = \rho A l / M_s$	TLCDと構造物の質量比
$r = b / l$	TLCDの有効質量比
$\omega_s = \sqrt{K_s / M_s}$	構造物の固有角振動数
$\omega_r = \sqrt{2g / l}$	TLCDの固有角振動数
$\zeta_s = C_s / 2 M_s \omega_s$	構造物の減衰比

$\rho A l$ の比であり、液柱の水平部分の質量と液柱全体の質量の比である。液柱の水平部分の質量が、構造物の水平振動抑制に有効であることから、パラメータ r が、方程式(3)中に表れているのである。

2.2 パッシブ T L C D の制振特性

ここでは、式(3)で示した運動方程式を用いて、T L C D の制振特性を数値シミュレーション結果を基に考察する。

構造物のモデルとしては、実際に T L C D を用いた制振が行われた東神戸大橋主塔のデータを用いることとした^{8) 9)}。構造物は、1 次モードのみの 1 自由度系としてモデル化した。構造物及び T L C D の諸元は、表-2 に示すとおりである。

表-2 数値シミュレーションにおける
構造物、T L C D の諸元

モード質量 (M_s)	705,600 (kg)
固有振動数 ($\omega_s/2\pi$)	0.259 (Hz)
構造物の減衰比 (ζ_s)	0.00159
質量比 (μ)	0.01
有効質量比 (r)	0.35
液体の密度 (ρ)	1,000 (kg/m ³)
液柱長さ (l)	7.469 (m)
液柱管幅 (b)	2.614 (m)
液柱管断面積 (A)	0.944 (m ²)

図-2 は、自由振動応答における構造物と T L C D の振幅をプロットしたものである。分かりやすいように、構造物の応答に包絡線を引いた。初期条件として、 $x=0.1$ (m), $\dot{x}=0$, $\xi=0$, $\dot{\xi}=0$ を与えている。構造物の応答を見ると、70 秒程度で一度 0 になった後、再び増加している。これは、構造物と T L C D のうなりによるものである。

図-3 は、図-2 で示した構造物の応答の包絡線を、幾つかの κ について、プロットしたものである。 κ を大きくすると (オリフィスの開口率を小さくすると)、うなりによる振幅の増大効果は小さくなるが、初期での振幅の減衰が遅くなっていることがわかる。

図-4 は、調和外力に対する構造物変位の振動数応答曲線である。ここでは、例として、構造物質量で正規化した調和外力の振幅を $0.5[\text{cm/s}^2]$ とし、 κ を 1.0, 2.0 とした場合を示した。図-4 で示した最大応答倍率を、 κ ごとに、

外力を変化させてプロットしたものが、図-5 である。 $\kappa=1.0$ の場合は $0.6\text{--}1.0[\text{cm/s}^2]$ 、 $\kappa=2.0$ の場合は $0.3\text{--}0.5[\text{cm/s}^2]$ 、 $\kappa=4.0$ の場合は $0.2[\text{cm/s}^2]$ 付近の外力レベルでは有効であるが、その領域をはずれると、制振性能が落ちていることが分かる。また、 κ が大きくなると、性能を発揮できる領域が狭くなる。

このように、パッシブ T L C D は、応答に振幅依存性が存在し κ の値により制振効果が発揮できる領域が変化するので、広い範囲の振動に対応した、単一の最適な κ の値を選択するのは困難である。

3 セミアクティブ T L C D の制御則

ここでは、振幅依存性の存在するパッシブ T L C D の振幅依存性を解消し、より効率の良い制振性能を実現することを目的に、オリフィスの開口率を可変にしたセミアクティブ T L C D の制御則を構築し、その性能を検討する。

ここで、液体の運動中にオリフィスの開口率を変更することは、流れの乱れを引き起こし、速度や減衰などに影響を与える可能性や、開口率の変更に大きな力が必要となる可能性がある。そこで、本論文では、上記の影響を出来るだけ小さくするためにオリフィスの開口率の変更は、液柱の速度が 0 になる瞬間にのみ行うこととする。

Haroun ら⁹⁾の構築した制御則は、最適制御理論をベースにしており、開口率を時間的に連続に変化させる形で与えられているので、液体とオリフィスの相互作用の影響は大きいと考えられる。また、最適制御理論から導かれる最適制御力を減衰力で達成しようとしているが、減衰力は液体の速度の逆向きにしか働かないので、セミアクティブ T L C D は必ずしも最適制御力を発揮できないという問題がある。

ここでは、全く別のアプローチとして自由振動に着目し、自由振動応答時の系の減衰を最大にするように制御則を構築する。制御則の構築にあたっては、まず、摂動解析を用いて T L C D - 構造物連成系のモード特性を、解析的な形で表す。その後、これらの摂動解に基づいて 2 つの制御則を求める。

3.1 摂動解析によるモード特性

摂動解析を適用するにあたり、簡単のため、T L C D の水頭損失の線形化を行う。線形化の手法としては、調和振動において、半周期間のエネルギーロスが等しい粘性減衰系で置き換えることとした。その結果、等価な線形系における減衰比 ζ_T は、

$$\zeta_T = \frac{\kappa \omega_T^3 \xi_0}{3 \omega_s \pi g} \quad (4)$$

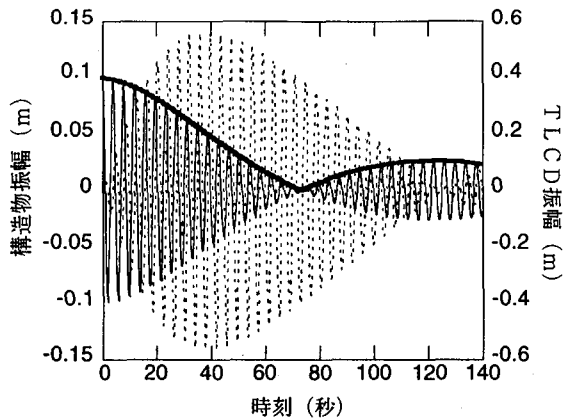


図-2 パッシブTLCDを用いた時の
自由振動応答 ($\kappa=1.0$)

——: 構造物振幅, - - - -: T L C D 振幅
——: 構造物振幅の包絡線

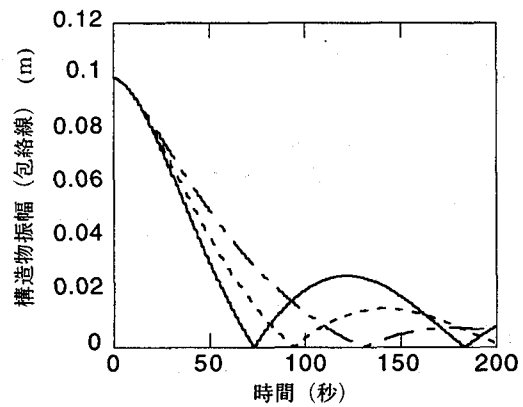


図-3 パッシブTLCDを用いた時の
自由振動応答の包絡線

——: $\kappa=1.0$, - - - -: $\kappa=2.0$
——: $\kappa=4.0$

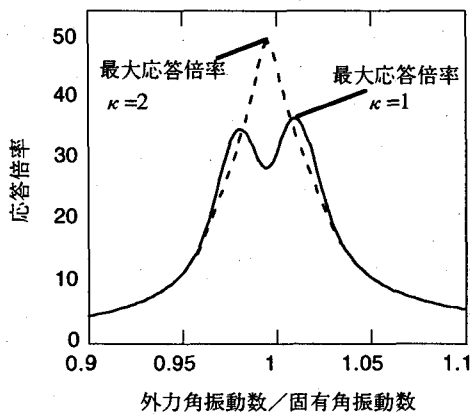


図-4 パッシブTLCDを用いた時の
調和外力に対する応答

(——: $\kappa=1.0$, - - - -: $\kappa=2.0$,
外力/構造物質量 $0.5[\text{cm/s}^2]$)

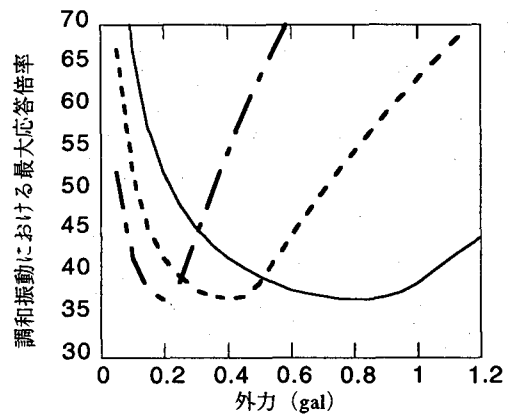


図-5 パッシブTLCDを用いた時の
調和外力に対する最大応答

——: $\kappa=1.0$, - - - -: $\kappa=2.0$
——: $\kappa=4.0$

で与えられる³⁾。ただし、 ξ_0 は、オリフィス調節時の液柱の変位である。また、この ζ_T を等価減衰比と呼ぶこととする。従って、式(3)は、この ζ_T を持つ線形な方程式、

$$\begin{bmatrix} 1+\mu & \mu r \\ r & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\xi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\omega_s \zeta_s & 0 \\ 0 & 2\omega_T \zeta_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_s^2 & 0 \\ 0 & \omega_T^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \xi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

と、等価である。

ここで、摂動解析を行うにあたって、以下の仮定を導入する。

- (1) T L C D と構造物の質量比は、建設系構造物では小さいので、 $\varepsilon=10^{-1}$ として、 $\mu=O(\varepsilon^2)$ である。
- (2) T L C D の等価減衰比は、T M D の最適減衰比¹⁰⁾や T L C D の最適減衰比から考えても $\zeta_T=O(\varepsilon)$ 程度であると考えられる。
- (3) T L C D の固有周期は、最適同調比に調節されていると考えて、 $\omega_s \approx \omega_T \approx \omega_a \equiv \frac{1}{\sqrt{1+\mu}} \omega_s$ とする。
- (4) 構造物の減衰は無視できる程度に小さいと考え、 $\zeta_s \approx 0$ とする。

また、T L C D の最適減衰比ならびに最適同調比の厳密な解析解は、摂動解析によらずに求めることが可能であるので、参考までに付録に示した。

これらの仮定をもとに、摂動解析を用いて複素固有値解析を行う。摂動の中心を0次オーダーの解である $\lambda^* = \omega_a(i - \zeta_T/2)$ とし、微小なオーダーの項を無視することによって、モード固有角振動数、モード減衰比は、それぞれ

$$\omega_{1,2} = \omega_a(1 \pm \text{Im}[\beta]/2) \quad (6)$$

$$\zeta_{1,2} = \omega_a(\zeta_T \pm \text{Re}[\beta])/2 \quad (7)$$

と導くことができる（複号同順）¹¹⁾。ここに、

$$\beta = \sqrt{\zeta_T^2 - \mu r^2} \quad (8)$$

である。また、対応するモード形は、

$$\Phi_{1,2} = \begin{Bmatrix} \phi_x \\ \phi_\xi \end{Bmatrix}_{1,2} = \begin{Bmatrix} 1 \\ -\frac{1}{\mu r}(\zeta_T \pm \beta)i \end{Bmatrix} \quad (9)$$

で与えられる。

図-6は、モード固有角振動数、モード減衰比の摂動解と複素固有値解析による解を $\mu=0.01$, $r=0.35$, $\zeta_s=0$ の場合について比較したものである。固有角振動数、減衰比とも非常に精度の良い近似になっていることが分かる。

3.2 セミアクティブ T L C D の制御則

本節では、3.1で得られた摂動解をもとに、2つの制御則を提案する。最初の制御則（制御則1）は、システムのモード減衰が最大になるような最適等価減衰比 $\zeta_T^{optimal}$ を求め、その値を保つ κ を求めることによって構築する。もう1つの制御則（制御則2）は、等価減衰比を固定せず、

モード形の変化を利用して常に高減衰モードが励起されるような ζ_T を決定し、その ζ_T に応じた κ を求めることによって構築する。なお、これらの制御則は、構造物の自由振動応答に対する考察をもとに導かれている。

制御則1

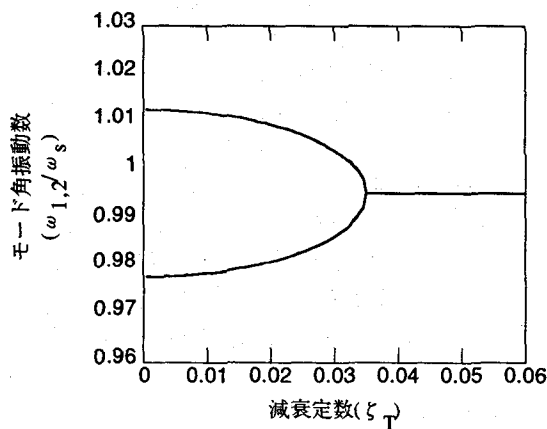
図-6 (b) から分かるように、 ζ_T がある程度大きくなると、2つのモードの減衰比は、高減衰と低減衰に分岐する。自由振動応答において十分時間が経過すると、低減衰モードの振動が卓越するので、両モードの減衰が等しく高くなる ζ_T が最適等価減衰比 $\zeta_T^{optimal}$ であると考えられる。この $\zeta_T^{optimal}$ は、図-6 (b) に見られるモード減衰の分岐点 ($\zeta_T=0.035$) に対応し、式 (7), (8) より、

$$\zeta_T^{optimal} = r\sqrt{\mu} \quad (10)$$

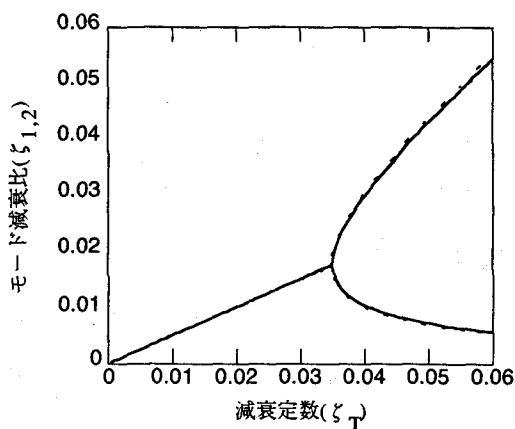
と表せる。このとき、対応する κ は、式 (4) より、次のように与えられる。

$$\kappa = \frac{3\pi g r \sqrt{\mu}}{\omega_a^2 \xi_{50}} \quad (11)$$

これは、液柱の変位 ξ_0 の関数であり、液柱の変位を測定し、オリフィスの開口率にフィードバックする必要があることを示している。なお、ここでの最適等価減衰比の導出は、線形の減衰要素を持つ一般のTMDの最適減衰比を求める場合と同じ方法によっている¹²⁾。したがって、この $\zeta_T^{optimal}$ を用いることによってT L C Dの振幅依存性が除かれ、通常のTMDと同等の性能が発揮できると期待される。



a) モード固有角振動数



b) モード減衰比

図-6 モード固有角振動数とモード減衰比

——: 摂動解, - - - - : 数値解析解 ($\mu=0.01$, $r=0.35$, $\zeta_s=0$)

制御則2

制御則1は、TLC Dから振幅依存性を除き、線形のTMD並の性能を実現することを目指すものであった。ここでは、さらに高い性能を得るために、高減衰のモードのみが励起されるような(高減衰モードの寄与率を出来るだけ大きくするような)、TLC Dの等価減衰比 ζ_T を導く。その導出にあたっては、TLC Dの等価減衰比 ζ_T を変化させることによって式(9)の関係に従ってモード形を変化させることができること、さらに、モード形を変化させることで振動の2つのモードへの寄与率を変化させることができることを利用している。

3節の初めに述べたように、オリフィスの開口率は液柱の速度が0になったときにのみ調節するので、調節する瞬間の変位、速度はそれぞれ、 $\xi = \xi_0$ 、 $\dot{\xi} = 0$ である。また、自由振動の場合、式(9)で表されるモード形が純虚数であることから、TLC Dと構造物の位相差は、 90° と考えられるので、 $x = 0$ 、 $\dot{x} = \dot{x}_0$ とおく。開口率を調節する瞬間を $t = 0$ とすれば、各ゼロクロス間に励起される自由振動は、以下のように表される。

$$\begin{cases} x \\ \xi \end{cases} = \frac{2}{\zeta_T} \left(\frac{(\zeta_T - \beta)\dot{x}_0}{\omega_a} - \frac{\mu r \xi_0}{4} \right) i \Phi_1 e^{\lambda_1 t} - \frac{2}{\zeta_T} \left(\frac{(\zeta_T + \beta)\dot{x}_0}{\omega_a} + \frac{\mu r \xi_0}{4} \right) i \Phi_2 e^{\lambda_2 t} \quad (12)$$

ここで、 $\lambda_{1,2} = \omega_a(i - \zeta_T/2 \pm \beta/2)$ である。式(12)の右辺第1項が高減衰モード、第2項が低減衰モードの振動を表している。

式(12)よりわかるように、高減衰モードのみを励起するためには、低減衰モードにかかる係数を0にすればよい。すなわち、

$$\frac{(\zeta_T + \beta)\dot{x}_0}{\omega_a} + \frac{\mu r \xi_0}{4} = 0 \quad (13)$$

とすればよい。ここで、 $\zeta_T \gg \mu r^2$ を仮定すると、式(8)の関係から、式(13)は、

$$\frac{2\zeta_T \dot{x}_0}{\omega_a} + \frac{\mu r \xi_0}{4} = 0 \quad (14)$$

と単純化できる。式(14)を、TLC Dの等価減衰比について解くことにより、

$$\zeta_T = -\frac{\omega_a \mu r \xi_0}{2\dot{x}_0} \quad (15)$$

が得られる。式(15)において、TLC Dと構造物の応答の位相差が 90° の場合、 ζ_T は正の値をとるが、不規則な外力を受ける実際の振動では、位相差が 90° とは限らず式(15)で計算される ζ_T が負の値となることも考えられるので、制御則としては、式(15)の絶対値をとって、

$$\zeta_T = \left| \frac{\omega_a \mu r \xi_0}{2\dot{x}_0} \right| \quad (16)$$

を採用することにした。式(4)に式(16)を代入して、水頭損失係数 κ について解くと、

$$\kappa = \frac{3\pi}{2} \frac{\mu r g}{\omega_a} \frac{1}{|\dot{x}_0|} \quad (17)$$

となる。

式(17)の κ は構造物の速度の関数となっている。つまり、制御則1がTLC Dの変位のフィードバックになっていたのに対して、制御則2は構造物の速度のフィードバックになっている。なお、制御則2で与えられる等価減衰比 ζ_T は、式(16)からわかるように、TLC Dの振幅に比例し、構造物の振幅に反比例している。すなわち、TLC Dの振幅が構造物の振幅と比較して小さいときは、減衰を小さくしてうなりによって構造物のエネルギーを吸収し、大きいときは減衰を大きくしてTLC Dに蓄えられたエネルギーを消費させる形になっていると解釈できる。また、多自由度の構造物に対しては、1節に述べたように制振対象モードのモード形をとれば、TLC D設置位置での速度をフィードバックすればよい。

4. 数値シミュレーションによる制振効果の検証

図-3、図-5と同様に、セミアクティブTLC Dを用いた場合の自由振動応答、調和応答をそれぞれ図-7、図-8に表した。構造物及びTLC Dの設定値は、表-2のとおりである。また、風による振動を想定した定常ランダム振動応答を図-9に示した。

自由振動応答(図-7)では、制御則1、2とも、うなりによる振幅の増大が見られなくなっている。また、特に制御則2では、効果的な振動の低減がなされていることが分かる。これは、制御則1は、2つのモード減衰が等しく一定であるのに対して、制御則2は、高減衰モードのみを励起させることで、制御則1の減衰を超えるモード減衰で振動しているためと考えられる。また、比較のため、パッシブTLC D($\kappa = 1.0$)、無制振の結果をあわせて示した。

調和応答(図-8)の結果も、パッシブTLC D($\kappa = 1.0$)の結果をあわせて示した。両制御則とも、外力に対する制振性能の依存性が無くなり、どの外力レベルに対しても同等の性能が発揮されている。特に制御則2が制振効果が高いことがわかる。また、図には示していないが、

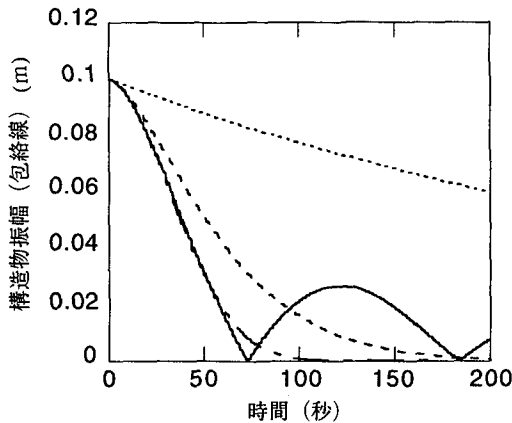


図-7 自由振動応答の包絡線

——: パッシブ ($\kappa=1.0$)
 - - - - : セミアクティブ (制御則 1)
 — · — · : セミアクティブ (制御則 2)
 ·····: 無制振

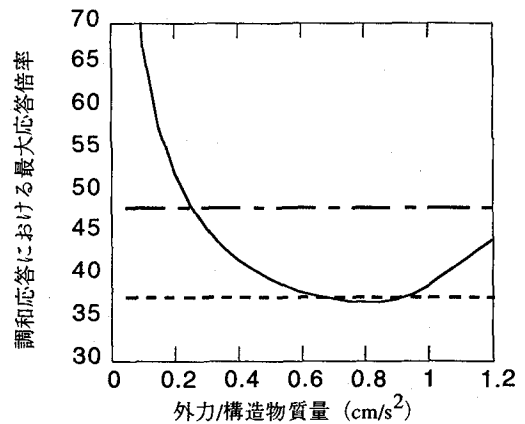


図-8 調和外力に対する最大応答

——: パッシブ ($\kappa=1.0$)
 - - - - : セミアクティブ (制御則 1)
 — · — · : セミアクティブ (制御則 2)

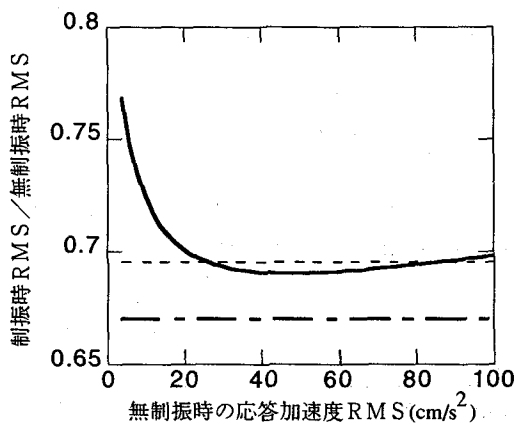


図-9 ランダム外力に対する応答加速度

——: パッシブ ($\kappa=1.0$)
 - - - - : セミアクティブ (制御則 1)
 — · — · : セミアクティブ (制御則 2)

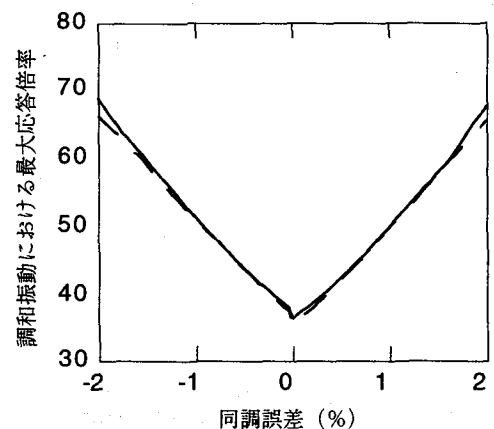


図-10 同調誤差の制振性能への影響

——: パッシブ ($\kappa=1.0$)
 - - - - : セミアクティブ (制御則 2)

無制振時の構造物の応答倍率は、約310倍である。なお、外力が $0.6-0.8[\text{cm/s}^2]$ の領域では、 $\kappa=1.0$ のパッシブTLC Dの方が高い性能を示している。それは、ここで求められた2つの制御則は、自由振動応答に関する考察を基に構築されており、調和応答に対しては必ずしも最適でないためであると考えられる。

ランダム振動応答 (図-9) は、定常な白色雑音を入力し、制振時 (パッシブ $\kappa=1.0$ 、セミアクティブ制御則1、2) の構造物の加速度応答のRMSと無制振時の加速度応答のRMSの比を、無制振時のRMSの関数として表した。ここでも、セミアクティブ制御では振幅依存性が解消され、

特に制御則2で良い結果を出していることがわかる。

図-10 は同調誤差の制振効果への影響を図示したものである。パッシブTLC Dは、 $\kappa=1.0$ で最も高い性能を得られる外力レベル ($0.8[\text{cm/s}^2]$) に対する応答倍率をプロットした。セミアクティブTLC Dによっても、最適同調比をはずれた場合の制振性能は、改善されていないことが分かる。

4. まとめ

本論文では、オリフィスの開口率を可変としたセミアクティブTLC Dの制御則を構築し、その性能を数値シミュ

レーションによって確認した。主たる結論は以下の通りである。

(1) オリフィスの開閉率の制御則として、T L C D—構造物系の低減衰モードの減衰を最大化する制御則(制御則1)と、高減衰モードを励起する制御則(制御則2)を、T L C Dの水頭損失に等価線形化を適用することによって導いたモード特性の摂動解を用いて、構築することができた。

(2) 数値シミュレーションによりセミアクティブT L C Dでは、パッシブT L C Dに見られた振幅依存性が解消され、外力のレベルにかかわらず一定の制振効果を確保できることが分かった。特に、制御則2では自由振動応答、調和応答、ランダム振動応答ともに、高い制振効果が得られている。

(3) 本制御則を用いたセミアクティブT L C Dによっても、パッシブ同調系ダンパーの問題点の1つである同調誤差に対する性能低下は改善されなかった。

ここで得られた制御則は自由振動応答に基づいているため、図-7に示したように調和外力が働く場合には必ずしも最適でない。そのため、外力の特性を考慮した制御則を構築することで、制振性能が改善する余地がある。また、本論文では、オリフィスの開閉による流体との相互作用の影響は、単純なモデルを用いることで無視した。実用化にあたっては、オリフィスと液体の相互作用の影響、オリフィスの開閉速度、水密性などについてハードウェアの検討を行う必要がある。

謝辞

本研究は、一部、財団法人服部報公会の工学研究奨励援助金によるものである。ここに記して謝意を表する。

付録

T L C Dの最適同調比、最適減衰比は、図-6の $\zeta_T = 0.035$ 付近のように、2つのモードの減衰が等しく高くなる同調比、減衰比として求められる。この ζ_T 及び ω_T は、2つのモードの固有角振動数ならびに減衰比が等しい解として解析的に、

$$\omega_T^{optimal} = \frac{\sqrt{1+\mu(1-r^2)}}{1+\mu} \omega_s$$

$$\zeta_T^{optimal} = r \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}$$

と求められる。このとき、対応するモード固有角振動数、モード減衰比は、

$$\omega_{1,2} = \frac{1}{\sqrt{1+\mu}} \omega_s$$

$$\zeta_{1,2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu(1-r^2)}}$$

と表せる。この $\omega_{1,2}$ を摂動の中心の ω_a として採用した。

参考文献

- 1) 津村直宜：制振事例，振動制御コロキウム，Part A, pp102-172, 1991.
- 2) Spencer, B.F.: Recent trend in vibration control in the U.S.A., Proc., 3rd International Conference of Motion and Vibration Control, Vol.2, pp. k1-k6, 1996.
- 3) 坂井藤一，高枝新伍，玉木利裕：液柱管ダンパー (Tuned Liquid Column Damper)の提案—液柱管の振動特性—，構造工学論文集，土木学会，Vol.34A, pp.543-552, 1989.
- 4) Abe, M, Igusa, T.: Semi-active dynamic vibration absorbers for controlling transient response, *Journal of Sound and Vibration*, (In press).
- 5) Haroun, M.A., Pires, J.A., Won, A.Y.J.: Active orifice control in hybrid liquid column damper, Proc., First World Conference on Structural Control, pp.FA1:69-78, 1994.
- 6) Abe, M., Igusa, T.: Tuned mass damper with closely spaced natural frequencies, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.24, pp.247-261, 1995.
- 7) Brevins, R, D: *Applied Fluid Dynamics Handbook*, van Nostrand Reinhold, 1984.
- 8) 坂井藤一，高枝新伍，玉木利裕：相似モデルによる液柱管ダンパーの制振実験，構造工学論文集，土木学会，Vol.36A, pp.603-613, 1990.
- 9) 坂井藤一，高枝新伍，玉木利裕：液柱管ダンパー (T L C D) の実験的研究，振動制御コロキウム，PartB, 土木学会，pp.189-196, 1991.
- 10) Den Hartog, J.P.: *Mechanical Vibrations*, Dover, 1984.
- 11) 木村周二：セミアクティブ同調液柱管ダンパー (T L C D) の提案 (東京大学卒業論文)，1996年3月.
- 12) 山口宏樹：構造振動・制御，共立出版株式会社，1996. (1996年9月6日受付)