218 圧電素子を用いたハイブリッド型制振システム

Vibration Suppression System based on Hybrid Piezoelectric Damping

○ 正 安達 和彦 (神戸大学) 学 栗蔵善文 (神戸大学大学院)
正 岩壺 卓三 (神戸大学)

Kazuhiko ADACHI Kobe University, Rokkodai-cho 1-1, Nada-ku, Kobe, Hyogo
Yoshifumi AWAKURA Kobe University
Takuzo IWATSUBO Kobe University

This paper aims at presenting the advantage of the separate type of the hybrid piezoelectric damping comparing with the previous series type of the hybrid piezoelectric damping from the viewpoint of active control power requirement. There are three types of the hybrid piezoelectric damping; one is a series type (integrated type, type I) and others are separated types in collocated and non-collocated conditions (types II and III). Simple flexible cantilever beam with surface bonded piezo-elements is used as a test structure. The results indicate that the hybrid piezoelectric damping whose configuration is type II and III are superior to the type I in active control power requirement under the severe vibration suppression performance condition.

Key Words: Vibration Suppression, Hybrid Piezoelectric Damping, Flexible Structure, Control Power Requirement.

1. 緒 言

圧電素子を用いて電氣的に構造物の減衰を増加させて構造物の弾性振動を制御する方法には、アクティブ制御とパッシブ制御がある。アクティブ制御系は圧電素子を制御電源で駆動することによって構成し (例えば文献 (1) など), パッシブ制御系は圧電素子に LR の受動素子を接続することによって構成する (例えば文献 (2), (3) など)。アクティブ制御系とパッシブ制御系を混成させた「ハイブリッド制振システム」では、同一の圧電素子を用いてアクティブ制御系とパッシブ制御系を同時に構成する場合についての研究 (例えば文献 (4), (5) など) が多い。著者は、異なる圧電素子を用いてアクティブ制御系とパッシブ制御系を個別に構成し、制振対象の構造物に両者を実装することによって構成するハイブリッド制振システムを提案している⁽⁶⁾。圧電素子を用いた構造物のハイブリッド制振システムの基本的な構成について調べている研究がこれまでにほとんど無く、著者の提案する構成とは異なる構成について比較を行っている少数の研究 (例えば文献 (7) など) があるにすぎない。

本報では、圧電素子を用いた構造物のハイブリッド制振システムの基本的な構成を示し、それぞれの制振システムの設計方法を提案する。また、それぞれの制振システムの特性の違いを制振に必要とするエネルギー消費の観点から明らかにする。なお本報では、機械構造物の板状あるいは殻状の部分に生じる弾性振動を抑制するために圧電素子を構造物の表面に取り付けて制振システムを構成する場合に限定して議論する。既報⁽⁶⁾と同様の片持ちはり形の構造物を用いた制振実験を行い、制振システムの特性の違いと提案する設計方法の有効性を検証する。

2. 記 号 表

C_p	圧電素子の静電容量の値
f	構造物の有限要素モデルの外乱ベクトル
G	アクティブ制御系で圧電素子に印加する制御電圧を生成する状態フィードバックゲイン
L	圧電素子に接続する電気回路の誘導素子の値
q	圧電素子の電極での電荷

R	圧電素子に接続する電気回路の抵抗素子の値
U	ハイブリッド制振システムに要求される制御力
v	圧電素子に印加される制御電圧
W	ハイブリッド制振システムのエネルギー消費
$\tan \delta$	圧電素子の誘電損失係数
ζ	モード減衰係数
η	モード変位
θ	圧電素子の電気・機械連成ベクトル
ϕ	モード行列の列成分から成るベクトル
ω	固有円振動数

($\cdot$) _I	I 型のハイブリッド制振システムを示す
($\cdot$) _{II}	II 型のハイブリッド制振システムを示す
($\cdot$) _{III}	III 型のハイブリッド制振システムを示す
($\cdot$) _a	アクティブ制御系を示す
($\cdot$) _e	電気系を示す
($\cdot$) _i	第 i 次の振動モードを示す
($\cdot$) _m	機械系を示す
($\cdot$) _p	パッシブ制御系を示す
($\cdot$) _s	圧電素子を短絡することを示す

3. ハイブリッド制振システムの構成

機械構造物の板状あるいは殻状の部分に生じる弾性振動を抑制するために圧電素子を構造物の表裏の両面に取り付けてハイブリッド制振システムを構成する場合、図 1 の (a)~(c) に示す三種類に分類できる。著者は、図 1 (a) のように圧電素子に LR の受動素子と制御電源を直列に接続して構成するハイブリッド制振システムを「直列型ハイブリッド制振システム」(以下 I 型制振システムと略記) と呼称する。また、図 1 (b) のように構造物上の同じ位置に表側と裏側から取り付けた圧電素子に LR の受動素子と制御電源をそれぞれ個別に接続して構成するハイブリッド制振システムを「分離コロケート型ハイブリッド制振システム」(以下 II 型制振システムと略記) と呼称し、図 1 (c) のように構造物上の異なる位置に取り付けた圧電素子に LR の受動素子と制御電源をそれぞれ個別に接続して構成するハイブリッド制振システムを「分離非コロケート型ハイブリッド制振システム」(以下 III 型制振システムと略記) と呼称する。

Fig.1 Configuration of types I ~ III hybrid piezoelectric damping system

4. ハイブリッド制振システムの設計

4.1 構造物と圧電素子の連成系の支配方程式 圧電素子を取り付けた構造物の運動方程式にモード解析法(例えば文献(8)など)を適用して得られるモード空間での全次元モデルから低次元モデルを構成する。低次元モデルの第 i 次の振動モードに対してハイブリッド制振システムを設計する。このとき、第 i 次の振動モードに対する連成系の支配方程式が次式で与えられる。

$$\ddot{\eta}_i + 2\zeta_i\omega_i\dot{\eta}_i + \omega_i^2\eta_i = \phi_i^T \mathbf{f} + \phi_i^T \theta q_i, \quad (1)$$

$$L_i\ddot{q}_i + R_i\dot{q}_i + \frac{1}{C_p}q_i = \theta^T \phi_i \eta_i + v_i. \quad (2)$$

圧電素子に接続されている電気回路がLRの受動素子だけとなるパッシブ制御系の場合には、文献(2)で提案されている設計式を用いることにより、

$$L_i = \frac{1}{1 + \mu_{si}^2} \cdot \frac{1}{C_p \omega_{si}^2}, \quad R_i = \frac{\sqrt{2}\mu_{si}}{1 + \mu_{si}^2} \cdot \frac{1}{C_p \omega_{si}} \quad (3)$$

となる。ただし、

$$\mu_{si}^2 = \frac{\omega_i^2 - \omega_{si}^2}{\omega_{si}^2}, \quad \omega_{si}^2 = \omega_i^2 - \phi_i^T \theta C_p \theta^T \phi_i \quad (4)$$

とする。アクティブ制御系の制御電圧 v_i はフィードバック制御で生成する。II型およびIII型制振システムではアクティブ制御系とパッシブ制御系の電気回路が独立しているので、パッシブ制御系の L_i と R_i の値は式(3)を用いて設計できる。アクティブ制御系のフィードバックゲインの値は、ハイブリッド制振システムに要求される制振性能を達成できるように設計する。

一方、I型制振システムでは、アクティブ制御系とパッシブ制御系の電気回路が直列に接続されているので、式(3)を用いて L_i と R_i の値を設計することができない。4.2節では、アクティブ制御系から見てパッシブ制御系を入力整形フィルタと考え、フィルタ包含準最適制御法(9)を利用したI型制振システムの設計方法を提案する。

4.2 I型制振システムの設計

STEP 1 アクティブ制御系が無いと仮定してパッシブ制御系の誘導素子と抵抗素子の初期値 $\widetilde{L}_{li}$ と $\widetilde{R}_{li}$ を式(3)を用いて設計する。

STEP 2 アクティブ制御系の制御電圧 v_{li} は、STEP 1で設計した初期のパッシブ制御系を組込んだ連成系で

の状態フィードバック制御則

$$v_{li} = -G_{li1}\dot{\eta}_i - G_{li2}\eta_i - G_{li3}\dot{q}_i \quad (5)$$

で生成する。フィードバックゲイン G_{li1} 、 G_{li2} と G_{li3} はフィルタ包含準最適制御法(9)を適用して以下のように決定する。I型制振システムの状態方程式は、

$$\dot{\mathbf{z}}_{mi} = \mathbf{A}_{lmi}\mathbf{z}_{mi} + \mathbf{B}_{lmi}\mathbf{q}_i, \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_{ei} = \mathbf{A}_{lei}\mathbf{z}_{ei} + \mathbf{B}_{lei1}\mathbf{z}_{mi} + \mathbf{B}_{lei2}v_{li} \quad (7)$$

で与えられる。ここで、

$$\mathbf{z}_{mi} = \begin{Bmatrix} \dot{\eta}_i \\ \eta_i \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{lmi} = \begin{bmatrix} -2\zeta_i\omega_i & -\omega_i^2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_{lmi} = \begin{Bmatrix} \phi_i^T \theta_l \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{z}_{ei} = \begin{Bmatrix} \dot{q}_i \\ q_i \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{lei} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{li}}{L_{li}} & -\frac{1}{L_{li}C_{pl}} \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_{lei1} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\phi_i^T \theta_l}{L_{li}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{lei2} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{L_{li}} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

となる。式(6)と式(7)から構成される拡大系に対して、制御電圧 v_{li} を最適レギュレータ理論(10)を用いて連成系の全状態フィードバック制御則

$$\widetilde{v}_{li} = -\widetilde{\mathbf{G}}_{li}\mathbf{Z}_i, \quad \widetilde{\mathbf{G}}_{li} = [G_{li1} \ G_{li2} \ G_{li3} \ G_{li4}],$$

$$\mathbf{Z}_i = \begin{Bmatrix} \mathbf{z}_{mi} \\ \mathbf{z}_{ei} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

で生成する。準最適制御理論(9)(11)を適用することにより、式(10)から式(5)が得られる。

STEP 3 式(5)の電流フィードバック項をパッシブ制御系で実現することとし、誘導素子と抵抗素子の値を以下のように修正する。

$$L_{li} = \widetilde{L}_{li}, \quad R_{li} = \widetilde{R}_{li} + G_{li3} \quad (11)$$

アクティブ制御系の制御電圧 v_{li} は機械系の状態フィードバック制御則

$$v_{li} = -G_{li1}\dot{\eta}_i - G_{li2}\eta_i \quad (12)$$

で生成する。

4.3 II型およびIII型制振システムの設計 分離コロケート型ハイブリッド制振システム(II型制振システム)では図1(b)に示すようにLRの受動素子と制御電源が別々に圧電素子に接続されているので、II型制振システムの支配方程式が以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} \ddot{\eta}_i + 2\zeta_i\omega_i\dot{\eta}_i + \omega_{IIasi}^2\eta_i \\ = \phi_i^T f + \phi_i^T \theta_{IIa} C_{pIIa} v_{IIi} + \phi_i^T \theta_{IIp} q_{pi}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$L_{IIi} C_{pIIp} \ddot{q}_{pi} + R_{IIi} C_{pIIp} \dot{q}_{pi} + q_{pi} = C_{pIIp} \theta_{IIp}^T \phi_i \eta_i \quad (14)$$

ただし、

$$\omega_{IIasi}^2 = \omega_i^2 - \phi_i^T \theta_{IIa} C_{pIIa} \theta_{IIa}^T \phi_i \quad (15)$$

とする。

分離コロケート型(II型)と分離非コロケート型(III型)のハイブリッド制振システムは同一の手順で設計できるので、以下ではII型制振システムの設計手順を示す。III型制振システムの設計では、以下の設計手順の添え字(・)_{II}を(・)_{III}に変更する。

STEP 1 アクティブ制御系の制御電圧 v_{IIi} は、最適レギュレータ理論⁽¹⁰⁾を適用して機械系の状態フィードバック制御則

$$v_{IIi} = -G_{IIi1}\dot{\eta}_i - G_{IIi2}\eta_i \quad (16)$$

で生成する。

STEP 2 パッシブ制御系の誘導素子 L_i の値と抵抗素子 R_i の値は、文献(2)の設計式を用いて、

$$\begin{aligned} L_{IIi} &= \frac{1}{1 + \mu_{IIsi}^2} \cdot \frac{1}{C_{pIIp} \omega_{IIsi}^2}, \\ R_{IIi} &= \frac{\sqrt{2}\mu_{IIsi}}{1 + \mu_{IIsi}^2} \cdot \frac{1}{C_{pIIp} \omega_{IIsi}} \end{aligned} \quad (17)$$

で与えられる。ただし、

$$\begin{aligned} \mu_{IIsi}^2 &= \frac{\omega_{IIasi}^2 - \omega_{IIsi}^2}{\omega_{IIsi}^2}, \\ \omega_{IIsi}^2 &= \omega_{IIasi}^2 - \phi_i^T \theta_{IIp} C_{pIIp} \theta_{IIp}^T \phi_i \end{aligned} \quad (18)$$

とする。

STEP 3 要求される制振性能を達成できるまでSTEP 1とSTEP 2を繰り返す。

5. 性能評価

制振性能は、制振対象とする第 i 次の振動モードにおいて構造物に入力される外乱から構造物上の観測点までのアクセランス伝達関数のゲインの値で評価する⁽⁶⁾。

制振によるエネルギー消費は、制振対象とする第 i 次の振動モードにおいてハイブリッド制振システムに要求される制振性能を達成するためのアクティブ制御系で消費する電力で評価する。I型制振システムで要求される制御

力を U とすると制振対象とする第 i 次の振動モードでの消費電力が次式で評価できる。

$$W_{Ii} = R_{Ii} C_{pi} \frac{1 + \mu_{Isi}^2}{\mu_{Isi}^2} \left\{ U - \frac{\mu_{Isi}^2 \omega_i}{R_{Ii} C_{pi} (1 + \mu_{Isi}^2)} \eta_i \right\}^2 \quad (19)$$

II型とIII型制振システムでは以下ようになる。

$$W_{IIi} = \left\{ U^2 - \frac{\mu_{IIsi}^2 \omega_{IIasi}^4}{2(1 + \mu_{IIsi}^2)} \eta_i^2 \right\} \frac{1}{\mu_{IIasi}^2 \omega_{IIasi}} \tan \delta \quad (20)$$

$$W_{IIIi} = \left\{ U^2 - \frac{\mu_{IIIsi}^2 \omega_{IIIasi}^4}{2(1 + \mu_{IIIsi}^2)} \eta_i^2 \right\} \frac{1}{\mu_{IIIasi}^2 \omega_{IIIasi}} \tan \delta \quad (21)$$

6. 制振実験

6.1 実験装置 制振対象の構造物には、既報⁽⁶⁾と同一の図2に示す長さ0.3(m)、幅0.02(m)、厚さ0.001(m)の鋼板製の片持ちはりを用いる。はりの両面のNo.1～No.4の位置にチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)系の圧電素子(富士セラミックス製: C-6材, 0.03(m)×0.02(m)×0.0003(m))を取り付ける。上記以外のはりと圧電素子の諸元を表1に示す。表1の圧電素子の物性値は、カタログ値(h 形式)を記載している。圧電素子は、はりの両面の二枚で一組とし、受動型あるいは能動型の電気回路を接続することによって制振システムを構成する。No.1～No.4の二枚一組の圧電素子の静電容量と誘電損失係数の実測値はそれぞれ約 $13.8 \times 10^{-3}(\mu F)$ と約 1.4(%) となる。

6.2 結果と考察 No.1とNo.2の二組の圧電素子を用いて片持ちはりの弾性一次の曲げ振動モードに対してI型～III型制振システムが同一の制振性能を実現するように設計し、制振によるエネルギー消費の比較を行った結果を図3に示す。図3の横軸は制振システムに要求する制振性能を示し、縦軸は制振によるエネルギー消費を示す。図3では、式(19)～式(21)で計算した制振によるエネルギー消費と実験的に求めた制振によるエネルギー消費を示している。シミュレーションと制振実験の結果はほぼ一致している。制振システムに要求する制振性能が低い場合(例えば、図3でアクセランス伝達関数のゲインが37(dB)以上の場合)には、制振によるエネルギー消費はI型制振システムでもっとも少なくなっている。しかし、制振システムに要求する制振性能が高くなるにしたがって、I型制振システムでの制振によるエネルギー消費が急激に増加する。例えば、図3でアクセランス伝達関数のゲインが35(dB)以下となるような制振性能に対しては、制振によるエネルギー消費はII型とIII型の制振システムの方が、I型制振システムでの制振によるエネルギー消費よりも少なくなる傾向にある。制振システムに要求する制振性能が高い場合に、II型とIII型の制振システムでの制振によるエネルギー消費が、I型制振システムでの制振によるエネルギー消費よりも少なくなる度合いは、弾性一次の曲げ振動モードよりも弾性二次の曲げ振動モードで顕著となっている。以上の結果は、外乱の大きさ変化するような場合に、I型～III型の三種類のハイブリッド制振システムの特性の違いを利用することによって新しいハイブリッド制振システムの構築が可能となることを示している。

Fig.2 Flexible cantilever beam with four pairs of surface bonded piezo-elements⁽⁶⁾

Table 1 Specification of cantilever beam⁽⁶⁾ and piezo-element

Cantilever beam	
Density ρ_s	$7.86 \times 10^3 (\text{kg/m}^3)$
Young's modulus E_s	$2.06 \times 10^{11} (\text{N/m}^2)$
Piezoelectric ceramic tile	
Density ρ_p	$7.82 \times 10^3 (\text{kg/m}^3)$
Young's modulus E_{p11}^D	$1.39 \times 10^{11} (\text{N/m}^2)$
Piezoelectric constant h_{31}	$-1.20 \times 10^9 (\text{V/m})$
Impermittivity β_3^e	$1.47 \times 10^8 (\text{m/F})$
Allowable voltage	$4.50 \times 10^2 (\text{V/mm})$

7. 結 言

本報では、圧電素子を用いた構造物のハイブリッド制振システムの基本的な構成を示し、それぞれの制振システムの設計方法を提案した。片持ちはり形の構造物を用いた制振実験と制振シミュレーションを行い、それぞれの制振システムの特性の違いを制振に必要とするエネルギー消費の観点から明らかにした。

文 献

- (1) N.W.Hagood, ほか 2 名, *J. Intell. Mater. Syst. & Struct.*, 1, (1990), 327-354.
- (2) N.W.Hagood and A.von.Flotow, *J. Sound Vib.*, 146-2, (1991-2), 243-268.
- (3) J.J.Hollkamp, *J. Intell. Mater. Syst. & Struct.*, 5, (1994-1), 49-57.
- (4) G.S.Agnes, *Proc. of SPIE*, 2193, (1994), 24-34.
- (5) K.W.Wang and S.P.Kahn, *Proc. of SDVNC '95*, Hong Kong, December 5-7 (1995), 1059-1064.

	Simulation	Experiment
Full Active	-----	○
Type I	-----	△
Type II	—————	□
Type III	—————	◇

Fig.3 Performance evaluation of types I ~ III hybrid piezoelectric damping

- (6) 安達・ほか 2 名, 機論, 66-652 C, (2000-12), 3867-3878.
- (7) M.S.Tsai and K.W.Wang, *Proc. of SPIE*, 3045, (1997), 82-93.
- (8) 長松, モード解析, (1985), 53-98, 培風館.
- (9) 背戸・ほか 4 名, 機論, 63-609 C, (1997-5), 1413-1420.
- (10) J.J.D'Azzo and C.H.Houpis, *Linear Control System Analysis and Design*, 3rd edition, (1988), 552-563, McGraw-Hill Book Co.
- (11) R.L.Koust, *IEEE Trans. Autom. Control*, 15-5, (1970-5), 557-563.