モーメント要素による柔軟はりの波動制御*

田中 信雄^{*1}, 菊島 義弘^{*1}, 黒田 雅治^{*1}

Active Wave Control of a Flexible Beam using Moment Actuators

Nobuo TANAKA, Yoshihiro KIKUSHIMA and Masaharu KURODA

With a view to applying the active wave control method for suppression of all vibration modes of a large scale-structure, a new type of moment-driven actuator using a piezo-electric ceramic is presented. Actuators for this purpose are required to be small and light, and still have enough power to control low-frequency vibration. From the viewpoint of applying moment control, two control laws for the active sink method are derived; one is to eliminate incident waves and the other to suppress transmitted waves. A standing wave suppression type state control method, which makes possible the dormancy of vibration modes, is also presented. Next, the ABC method is presented, by means of which a vibration-free state in a beam is achieved. The control effects due to these methods are discussed. Experimental results using the moment-driven actuators are also presented, demonstrating the effectiveness of these methods. Finally, the effect of structural damping of a beam on the control effect of the wave control method is discussed, and the relationship between power flow and structural damping clarified.

Key Words: Vibration, Wave Control, Flexible Beam, Vibration Control, Active Sink, State Control, ABC Method, Power Flow, Progressive Wave, Standing Wave

1. 緒 言

無限長はりや無限平板の振動特性を、有限長はりや有限平板に移植することにより、それらが固有に持つすべての振動モードを不活性化する波動制御法^{(1)~(7)}が提案されている。まず、著者らは自由・自由はりを対象として、フィードフォワード形アクティブ・シンク法の提案⁽⁵⁾を行い、その最適設計式を導出するとともに、実験によりアクティブ・シンクの存在を立証⁽⁶⁾した。その際に、全振動モードの不活性化は、進行波形抑制法に位置づけられるアクティブ・シンク法以外にも、振動モードと不整合な定在波を生成することで、同様な不活性化が達成できる定在波形抑制法⁽⁶⁾を合わせて提示した。さらに、フィードバック形アクティブ・シンク制御則⁽⁷⁾の導出を行い、在来の制御法に基づく制振効果との比較を行い、アクティブ・シンク法の秀逸性を立証した。また、薄肉平板を対象として、アクティブ・シンク法の適用^{(8)~(9)}を試みている。

さて、アクティブ・シンク法を、大形宇宙構造物に代表されるような、無数ともいえる振動モードを有する柔軟構造物に適用する段になると、その用途に適合す

るアクチュエータが必要となる。本研究で目標とする宇宙構造物の制振に関していえば、小形かつ軽量で、低周波数領域より制振パワーの得られるアクチュエータが必須となる。

これまでに報告されているアクチュエータを総括すると、基本的にはせん断力および曲げモーメントを操作量とする2種類に分類されよう。中でも、せん断力タイプに属し、慣性力を操作量とするアクティブ・ダンパ^{(10)~(12)}に関する報告例は多いが、本方式は質量の増加をもたらすばかりでなく、低周波領域での制振効果に難点がある。これに対して、相対力を利用して曲げモーメントを発生するタイプは、その機構からして低周波数領域からの制振パワーが期待できる。これには、油圧サーボ機構を用いる方式⁽¹³⁾と圧電素子^{(14)~(16)}を利用する方式が提案されており、後者の圧電素子を使用する方法が本研究の趣旨にかなっているものと考えられる。しかしながら、これまでの報告例は、圧電素子膜を対象構造物に添付する方法が大半で、依然として十分な制御パワーは得られておらず、また脆弱性にも問題がある。そこで、本論文では、積層形圧電素子を使用するモーメント・アクチュエータを考案し、これまで提案されたメカニズムの難点を解決し、これを波動制御用アクチュエータとして使用することとする。

* 原稿受付 平成4年2月4日。

^{*1} 正員、工業技術院機械技術研究所(●305 つくば市並木1-2)。

まず本論文では、モーメントを操作量とするアクティブ・シンク制御則を導出することから始める。その際に、外乱作用点とアクティブ・シンク作用点間の領域において、反射波を零とする制御則と、アクティブ・シンク作用点の透過波を零とする2種類のアクティブ・シンク制御則を誘導する。さらに、これまでの波動制御法とは立場を異にし、任意点での状態量を制御する状態制御法を提案し、その応用例として、外乱が作用する箇所をその節とすることで、全振動モードの不活性化が可能となることを明らかにするとともに、モーメント・アクチュエータを2個使用することにより、ABC法⁽¹⁷⁾が可能になることを示す。次に、試作したモーメント・アクチュエータを用い、モーメント制御を基礎とするアクティブ・シンク効果ならびに状態制御効果を検証する。最後に、構造減衰のアクティブ・シンク効果に及ぼす影響について考察を進めるとともに、はりを伝搬するパワーフローと構造減衰の関係についても言及する。

2. モーメント・アクチュエータの特性

試作したモーメント・アクチュエータの外形図を図1に示す。2個の積層圧電素子が直列に設置され、これらに駆動電圧が作用することにより、素子両端のコラムを加振する。その際に発生する力と、はり・素子間距離を乗じた状態量が曲げモーメントとしてはりに作用する。モーメント・アクチュエータがこのような構造をとることで、脆弱性が回避でき、積層圧電素子を用いることで制振パワーも得やすい。

駆動電圧と二段直列形圧電素子が発生する力の関係を図2に示している。本図は、圧電素子・コラム間にロードセルを挿入して測定したもので、予荷重の値によって発生力は変化することがわかる。なお、予荷重は図1に示すボルトの押込み量を調整することにより与えている。また、図2より明らかなように、圧電素子に特有のヒステリシスが認められる。なおモーメント・アクチュエータとして使用する際は、予荷重を705

図1 モーメント・アクチュエータ外形図

N, バイアス電圧を50 V 与え、正負のモーメントが発生できるようにしている。この条件下におけるモーメント・アクチュエータの周波数特性が図3に示されており、200 Hz までの範囲ではゲイン・位相特性がともにフラットであることがわかる。

3. モーメントを操作量とする柔軟はりの振動制御

3.1 状態制御法 図4に示すように、自由・自由はりの任意の箇所に制御モーメント m_1 , m_2 および外力 f_{in} が作用するものとする。この際の状態方程式を、

図2 積層圧電素子の駆動電圧と発生力の関係

図3 モーメント・アクチュエータの周波数特性

図4 はりモデル

伝達マトリックス⁽⁵⁾を用いて記述すると次式となる。

$$\mathbf{Z}_4 = \mathbf{T}_{40}\mathbf{Z}_0 + \mathbf{T}_{41}\mathbf{F}_1 + \mathbf{T}_{42}\mathbf{F}_2 + \mathbf{T}_{43}\mathbf{F}_{in} \quad \cdots \cdots (1)$$

ただし、 $\mathbf{Z}_i$ は節点*i*における状態ベクトル、 $\mathbf{T}_{ij}$ は節点*i, j*間の伝達マトリックス、 $\mathbf{F}_i$ は力の作用ベクトルを表し、各々次のように定義される。

$$\mathbf{Z}_i = \text{col.}(-\xi_i, \theta_i, M_i/EI, Q_i/EI) \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 ξ は曲げ振動のたわみ、 θ は傾き角、 M は曲げモーメント、 Q はせん断力、 EI は曲げ剛性、記号 col.は列ベクトルを表す。さらに、

$$\mathbf{T}_{ij} = \begin{bmatrix} t_1 & t_4 & t_3 & t_2 \\ k^4 t_2 & t_1 & t_4 & t_3 \\ k^4 t_3 & k^4 t_2 & t_1 & t_4 \\ k^4 t_4 & k^4 t_3 & k^4 t_2 & t_1 \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots (3)$$

ただし、

$$\begin{aligned} t_1 &= (e[-jk\delta_i] + e[-k\delta_i] + e[jk\delta_i] + e[k\delta_i])/4 \\ t_2 &= (-je[-jk\delta_i] + e[-k\delta_i] + je[jk\delta_i] + e[k\delta_i])/4k^3 \\ t_3 &= (-e[-jk\delta_i] + e[-k\delta_i] - e[jk\delta_i] + e[k\delta_i])/4k^2 \\ t_4 &= (je[-jk\delta_i] - e[-k\delta_i] - je[jk\delta_i] + e[k\delta_i])/4k \quad \cdots \cdots (4) \end{aligned}$$

$$k^4 = \rho A \omega^2 / EI \quad \cdots \cdots (5)$$

ここで、 δ_i は節点*i, j*間の距離、 ρ 、 A 、 $e[x]$ 、 ω 、 j は各々、密度、断面積、 e の*x*乗、角振動数、虚数単位を表す。また、

$$\mathbf{F}_i = \text{col.}(0, 0, m_i/EI, 0); i=1, 2 \quad \cdots \cdots (6)$$

$$\mathbf{F}_{in} = \text{col.}(0, 0, 0, f_{in}/EI) \quad \cdots \cdots (7)$$

$$\mathbf{Z}_0 = \text{col.}(-\xi_0, \theta_0, 0, 0) \quad \cdots \cdots (8)$$

$$\mathbf{Z}_4 = \text{col.}(-\xi_4, \theta_4, 0, 0) \quad \cdots \cdots (9)$$

さらに、

$$\mathbf{z}_0 = \text{col.}(-\xi_0, \theta_0) \quad \cdots \cdots (10)$$

$$\mathbf{f}_i = \text{col.}(m_i/EI, 0); i=1, 2 \quad \cdots \cdots (11)$$

$$\mathbf{f}_{in} = \text{col.}(0, f_{in}/EI) \quad \cdots \cdots (12)$$

と定義すると、

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_0 &= -_{40}\mathbf{t}^{-1}_{21}(_{41}\mathbf{t}_{22} \cdot \mathbf{f}_1 + _{42}\mathbf{t}_{22} \cdot \mathbf{f}_2 \\ &\quad + _{43}\mathbf{t}_{22} \cdot \mathbf{f}_{in}) \quad \cdots \cdots (13) \end{aligned}$$

となる。ただし、 $_{ij}\mathbf{t}_{kl}$ は伝達マトリックス $\mathbf{T}_{ij}$ を2行2列マトリックスに分解した際の、*k*行*l*列要素に当たる部分マトリックスを意味する。制御モーメント m_1 、

m_2 と外乱 f_{in} が与えられると、はり左端の状態ベクトル $\mathbf{Z}_0$ は一意に決定され、これを初期状態として、はりの任意点における状態量が決まる。

さて、制御モーメント m_2 が作用する節点2から外乱 f_{in} が作用する節点3までの領域に着目しよう。この部材内の任意点での状態ベクトル $\mathbf{Z}_x$ は、次のように記述される。

$$\mathbf{Z}_x = \mathbf{T}_{x2}\mathbf{Z}_2 \quad \cdots \cdots (14)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_2 &= \mathbf{T}_{20}\mathbf{Z}_0 + \mathbf{T}_{21}\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \\ &= \begin{bmatrix} _{20}\mathbf{t}_{11} \cdot \mathbf{z}_0 + _{21}\mathbf{t}_{12} \cdot \mathbf{f}_1 \\ _{20}\mathbf{t}_{21} \cdot \mathbf{z}_0 + _{21}\mathbf{t}_{22} \cdot \mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2 \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots (15) \end{aligned}$$

式(8)と(13)より明らかなように、初期ベクトル $\mathbf{Z}_0$ は制御モーメント m_1 、 m_2 と外乱 f_{in} の関数であるので、これらを形式的に分離すると、式(14)は次のように展開される。

$$\mathbf{Z}_x = \mathbf{A} \text{col.}(m_1, m_2) + \mathbf{b} f_{in} \quad \cdots \cdots (16)$$

ただし、 $\mathbf{A}$ は4行2列のマトリックス、 $\mathbf{b}$ は4行ベクトルとなる。

いま、制御モーメントを2個使用するものとする。 $\mathbf{Z}_x$ における任意の2個の状態変数 z_i 、 z_j を零とすることができ、その際の制御モーメントは、フィードフォワード形式として次のように求まる。

$$\text{col.}(m_1, m_2) = -\mathbf{A}_{ij}^{-1} \mathbf{b}_{ij} f_{in} \quad \cdots \cdots (17)$$

ただし、 $\mathbf{A}_{ij}$ 、 $\mathbf{b}_{ij}$ は $\mathbf{Z}_x$ の4要素のうち、零とすべき成分 z_i 、 z_j に対応する $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{b}$ の行要素(*i*行と*j*行)で構成される、2行2列マトリックスおよび2行ベクトルである。

3・2 波動制御法 節点2および3間の任意点*x*における状態ベクトル $\mathbf{Z}_x$ が式(14)で求めたので、波動ベクトル $\mathbf{w}_x$ は波動マトリックス⁽⁵⁾ $\mathbf{K}$ を用いて、次のように記述できる。

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_x &= \text{col.}(w_1, w_2, w_3, w_4) \\ &= \mathbf{K}^{-1} \mathbf{Z}_x \\ &= \mathbf{K}^{-1} \mathbf{T}_{x2} (\mathbf{T}_{20}\mathbf{Z}_0 + \mathbf{T}_{21}\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2) \quad \cdots \cdots (18) \end{aligned}$$

ここで w_1 、 w_3 は各々進行波(節点3より節点2の方向に伝搬する波動)および後退波、 w_2 、 w_4 は各々節点2および節点3より減衰するニアフィールドを表している。また、 $\mathbf{K}^{-1} \mathbf{T}_{x2}$ は次のように記述される。

$$\mathbf{K}^{-1} \mathbf{T}_{x2} = \frac{1}{4k^3} \begin{bmatrix} k^3 e[-jky], & jk^2 e[-jky], & -ke[-jky], & -je[-jky] \\ k^3 e[-ky], & -k^2 e[-ky], & ke[-ky], & -e[-ky] \\ k^3 e[jky], & -jk^2 e[jky], & -ke[jky], & je[jky] \\ k^3 e[ky], & k^2 e[ky], & ke[ky], & e[ky] \end{bmatrix} \quad \cdots \cdots (19)$$

ここで、*y*は節点2から任意点*x*までの距離を表す。すると、波動ベクトル $\mathbf{w}_x$ の4成分のうち、任意の2成分を

零とする制御則は、形式的には式(17)と全く同様に記述される。なお、アクティブ・シンク系を構成する際は、当該領域における反射波 w_1 を零(本論文ではこれを Case 1 とよぶ)とすればよいので、制御モーメントは m_1 のみでよい。

次に、はり左端から節点 1 までの部材に着目しよう。この領域における状態ベクトル $\mathbf{Z}_x$ は、

$$\mathbf{Z}_x = \mathbf{T}_{x0} \mathbf{Z}_0 \cdots \cdots \cdots (20)$$

波動ベクトルは

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_x &= \mathbf{K}^{-1} \mathbf{Z}_x \\ &= \mathbf{K}^{-1} \mathbf{T}_{x0} \mathbf{Z}_0 \cdots \cdots \cdots (21) \end{aligned}$$

と記述できる。この場合 w_3 を零(本論文ではこの制御則を Case 2 とよぶ)とすることは、節点 1 における外乱からの透過波を零とすることに相当する。この場合の制御則は次のように求まる。

$$m_1 = -\frac{k\alpha_2 - j\beta_2}{k\alpha_1 - j\beta_1} f_{in} \cdots \cdots \cdots (22)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= ({}_{40}t_{32} \cdot {}_{41}t_{43} - {}_{40}t_{42} \cdot {}_{41}t_{33})/\Delta \\ \alpha_2 &= ({}_{40}t_{32} \cdot {}_{43}t_{44} - {}_{40}t_{42} \cdot {}_{43}t_{34})/\Delta \\ \beta_1 &= ({}_{40}t_{41} \cdot {}_{41}t_{34} - {}_{40}t_{31} \cdot {}_{41}t_{43})/\Delta \\ \beta_2 &= ({}_{40}t_{41} \cdot {}_{43}t_{34} - {}_{40}t_{31} \cdot {}_{43}t_{44})/\Delta \\ \Delta &= {}_{40}t_{31} \cdot {}_{40}t_{42} - {}_{40}t_{32} \cdot {}_{40}t_{41} \cdots \cdots \cdots (23) \end{aligned}$$

ここで、 ${}_{ij}t_{kl}$ は伝達マトリックス $\mathbf{T}_{ij}$ の k 行 1 列要素を意味する。

3.3 ABC 法⁽¹⁷⁾ はり左端における状態ベクトル $\mathbf{Z}_0$ は、二つの制御モーメント m_1, m_2 を用いることにより、これを零ベクトルにすることができる。すると、節点 1 より左の部材における任意の状態ベクトル $\mathbf{Z}_x$ は、 $\mathbf{Z}_0$ に伝達マトリックス $\mathbf{T}_{x0}$ を乗じて得られるので、結局これも零ベクトルとなり、この領域は完全な無振動状態となる。この場合の制御則も、状態制御法の場合と全く同様に記述され、次のように表される。

$$\text{col.}(m_1, m_2) = -\mathbf{A}_{12}^{-1} \mathbf{b}_{12} f_{in} \cdots \cdots \cdots (24)$$

4. 数値解析

全長 2.77 m, 幅 50 mm, 厚さ 5.8 mm の鋼製自由・自由はりを対象として、数値解析の立場から、モーメントを操作量とする波動制御、状態制御および ABC 法の効果について明らかにしよう。なお、本章では外乱作用点をはり右端($l_3 = l_0$)とし、その駆動点コンプライアンス(ξ_0/f_{in})を図 5 の最上部に示している。

4.1 波動制御効果 アクティブ・シンク(Case 1)を、はり左端および $(1/3)l_0$ の箇所を設定した場合の駆動点コンプライアンスが、図 5 の上から 2 およ

び 3 段めに記載されており、アクティブ・シンク系を構成することで、すべての振動モードが不活性化されていることがわかる。また、利得特性は -30 dB/dec で単調減少し、半無限はりの駆動点コンプライアンスと合致している。

アクティブ・シンクをはり左端より全長の $2/3$ の位置に移動し、当該点における透過波 w_3 を零とする制御則(Case 2)を構じた場合のコンプライアンス(ξ_0/f_{in})が図の最下段に示されている。本制御則はアクティブ・シンク点の左部材を波動制御するもので、その結果右部材は非制御状態となるため、そのモード励振の影響が本コンプライアンスにも現れている。また、左部材では外乱パワーの注入がないため、当該部材における透過波 w_3 を除去することは、それと双対関係にある反射波 w_1 をも除去することになり、当該部材

図 5 アクティブ・シンク系のコンプライアンス

図 6 アクティブ・シンク制御則

での振動レベルは極めて低くなる。この様子は図5の利得特性が無限はりのそれよりもはるかに急激に減衰していることから理解されよう。しかしながら、制御則 Case 2 は ABC 法と異なり、当該部材での全状態量を零とすることはできず、節点1におけるニアフィールドが残留するため、完全な無振動状態は達成できない。なお、図5で使用したアクティブ・シンクの成立条件を利得・位相特性として示すと図6になる。

アクティブ・シンクを適用した際に得られる波動包絡線を図7に示す。これは、四次の振動モード(36.0 Hz)近傍を例にとったものであり、非制御時で最大3.1 mmに達している振動振幅が、アクティブ・シンクを講ずることで、その1/1000程度にまで抑制されている。アクティブ・シンクをはり左端に設置した Case 1 $\{l_1=0.0\}$ の場合は、はり全体にわたって進行波が支配し、振動モードが励起されることはない。アクティブ・シンク点を左端より1/3の位置に移動した Case 1 $\{l_1=(1/3)l_0\}$ の場合、外乱作用点よりアクティブ・シンク点までの領域では、進行波が発生しているのに対し、その左部材では定在波が立っている。

アクティブ・シンク点を $(2/3)l_0$ とし、Case 2 の制御則を適用した場合の波動包絡線が図の最下段に示さ

れている。前述のとおり、はり左端よりアクティブ・シンク点までの領域では、透過波 w_3 を除去することにより、無振動状態とはいかないまでも、かなりの低レベルまで振動振幅が抑制されていることがわかる。

4.2 状態制御効果 制御モーメント m_1 の作用点をはり左端とし、外乱作用点である右端を状態制御した場合のコンプライアンス $\{\xi_0/f_{in}\}$ が図8に示されている。せん断力形の外乱に対して、この点をせん断力に対する節(感度が零)となるように制御することで、波動制御法と同様に、全振動モードが不活性化できる。また波線で示されているアクティブ・シンク効果と比較すると明らかなように、ノッチを除けば、双方の特性はほぼ等しい。

四次モードを例にとり、状態制御効果を波動包絡線で示すと図9のようになる。変位分布図を見ると、はり右端が振動の節となっており、当該点での状態制御効果が確認できる。また、せん断力分布図において、せ

図8 状態制御を講じた場合のコンプライアンス

図7 アクティブ・シンクを講じた場合の波動包絡線 (四次の振動モード近傍)

図9 外乱作用点 ($l_b=l_0$) を状態制御した場合の状態変数波動包絡線

ん断力が右端で極大となっていることから、当該点でのたわみがせん断力に対する節となっていることがわかる。

4・3 ABC 効果 制御モーメントを2個設定し、はり左端の状態ベクトルを零とすることで、はり左端・制御モーメント作用点の間で、無振動状態が得られる。図10は、制御モーメント m_1 を $(1/3)l_0$ に設定し、 m_2 をさらに10 cm だけ右方に設置した際の、状態変数の波動包絡線(四次振動モード近傍)を示している。図より明らかなように、はりの全状態変数が左部材で零となり、完全な無振動状態になっている。

5. 実験結果

5・1 実験方法 解析で用いた仕様からなる鋼製はりを柔らかなばねでつるし、自由・自由の境界条件を与える。このはりの右端には、外力 f_m を与えるための動電形シェーカが設置され、シェーカ・はり間に取付けられたひずみ形力検出器(最大測定範囲4.9 N、重量5 g)により、外力が検出される。また、アクティブ・シンクの設置を想定する箇所に、2章で提示したモーメント・アクチュエータを取付け、制御モーメントを発生させる。この制御モーメントの駆動信号は、外力発生信号を基本とし、フェーズシフタによってその位相および利得を変化させることによって得る。

次に、このはりに沿って13 cm 間隔に22個の非接触形変位計(有効測定範囲0.5 mm、分解能0.5 μm)を配置し、データ・ロガーによってこれらの変位を同時サンプリングする。次に、取込まれたデータをマイクロ・コンピュータで信号処理し、さらに22点のデータ

図10 ABC法を適用した場合の状態変数波動包絡線

をスプライン補間し、振動波形として出力する。

5・2 実験結果 解析で使用した四次の振動モード(実験では33.6 Hz)を対象として、非制御状態の波動を可視化した結果が図11に示されている。横軸は、はり左端からの距離 x 、縦軸は時刻歴を表している。この際の加振力は0.147 Nであり、最大で446 μm の変位振幅が生じている。図12は、はり左端にモーメン

図11 非制御状態の波動包絡線と時刻歴応答実験結果

図12 はり左端をアクティブ・シンク点とした場合の波動包絡線と時刻歴応答実験結果

ト・アクチュエータを設置した場合の、アクティブ・シンク効果を示したものであり、外力作用点(右端)よりアクティブ・シンク点(左端)に向かって、波動が流入している様子がモアレじまから理解されよう。図上段の波動包絡線を見ると、非制御状態で発生していた節がなくなり、解析結果(図7)とほぼ同様な結果を得た。ただし、解析においては、モーメントが点入力するものと仮定しているが、実験においては、モーメント・アクチュエータのコラム間が8 cmの幅を持つため、その取付け箇所では解析結果との相違が見られる。また、この際の最大波動振幅は $12.5\text{ }\mu\text{m}$ (非制御時の2.8%)にまで抑制されている。

図13の上段および中段には、アクティブ・シンク点を $(1/3)l_0$ とした場合の波動包絡線(Case 1およびCase 2)が示されており、最大振幅が各々 $7.7\text{ }\mu\text{m}$ (1.7%)および $6.5\text{ }\mu\text{m}$ (1.5%)にまで抑制されている。また下段には、アクティブ・シンク点を左端として、外乱が作用する右端変位を零とする状態制御を講じた結果を示している。はり左端では解析結果(図9)との差異が見られるものの、全体的には解析結果とほぼ同様の波動包絡線が得られている。この際の最大振幅値は $8.7\text{ }\mu\text{m}$ (1.9%)にまで抑制されている。

6. 構造減衰と制御効果

6.1 構造減衰とアクティブ・シンク効果 これまでは、非減衰のはりを対象としてきたが、実際の系で

は多少なりともダンピングが存在する。そこで、本節では、損失係数 η を変化した場合のアクティブ・シンク効果について考察する。図14は、損失係数 η を0.0から0.05まで変化させた場合の駆動点コンプライアンス(非制御状態)を示したものであり、損失係数 η が0.01と0.05とでは、例えば一次の共振ピーク値において15 dB程度の差が生ずる。また、損失係数の値にかかわらず、いずれの駆動点コンプライアンスも半無限はりの特性に漸近していることに留意してほしい。図の最下段には、アクティブ・シンク(Case 1)をはり左端に設置した際の駆動点コンプライアンスが示されており、損失係数 η が0.0から0.05まで変化した場合では、その効果に何の影響も認められない。

6.2 構造減衰とパワーフロー 波動制御を講ずることにより進行波が生起されるので、外乱作用点よりアクティブ・シンク点へ向かうパワーフローが発生する。そこで本節では、はりを伝搬するパワーフロー

図14 損失係数を変化した場合の駆動点コンプライアンス

図13 波動包絡線実験結果

図15 振動インテンシティ比分布図

を振動インテンシティ⁽¹⁸⁾の観点より考察しよう。

図 15 はアクティブ・シンク (Case 1) を適用した際の、振動インテンシティ分布を表している。この場合、半無限はりを伝搬する際の振動インテンシティの値で正規化しているので、縦軸は振動インテンシティ比として示されている。まず、外乱作用点がはり右端、アクティブ・シンク点がはり左端の場合を見ると、振動インテンシティ比が -100% ($\eta=0.0$) となっている。これは、 x の負方向に半無限はりと同じレベルの振動エネルギーが伝搬していることを意味する。これに対し、構造減衰が存在すると、外乱よりはりに注入される振動エネルギーが、減衰しながらアクティブ・シンク点に向かう様子が理解されよう。したがって、外乱作用点での駆動点コンプライアンス (ξ_4/f_{in}) においては、構造減衰の影響は見られないものの、伝達コンプライアンス (ξ_0/f_{in}) においては、例えば $\eta=0.01$ と 0.05 の相違で 2 dB (100 Hz) の差が生じる。

アクティブ・シンク点をはり左端から $(1/3)l_0$ の箇所に移動した場合、図 15 の中央に示されている。非減衰の場合は、外乱作用点とアクティブ・シンク点の間で、半無限はりの特性が得られている。構造減衰が存在すると、わずかではあるが、アクティブ・シンク点から、はり左端に向かい振動エネルギーが移動する。次に、アクティブ・シンク点はそのままとし、外乱作用点が $(2/3)l_0$ の位置に移動した際の振動インテンシティ分布が、図の右側に示されている。この場合、外乱作用点より注入される振動エネルギーは 25% にまで減少し、それがアクティブ・シンク点に向かう。また、構造減衰が存在すると、外乱作用点では振動エネルギーの吹出し点になり、一方、アクティブ・シンク点では、わずかながら透過波が存在する結果となっている。

7. 結 言

曲げモーメントを操作量とする制御法の立場から、柔軟はりの振動制御法について明らかにした。本論文で得られた成果を要約すると次のようになる。

1. 積層形圧電素子を使用して、モーメント・アクチュエータの開発を行った。本アクチュエータは、小形かつ軽量で、低周波数領域より制振パワーを得ることができる特徴を有する。

2. 曲げモーメントを操作量とする状態制御法に関する制御則を導出した。この状態制御法を外乱作用点

に適用し、外乱に対する感度を零とすることにより、全振動モードを不活性化できる。

3. 曲げモーメントを操作量とする波動制御法に関する制御則を導出した。制御モーメントが一つの場合、これまでのアクティブ・シンク法⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾に相当する。

4. 制御モーメントを二つ使用することにより、はり左端から制御モーメント作用点までの領域を、無振動状態にする (ABC 法) ことができる。

5. アクティブ・シンク (Case 2) 効果は、進行波と後退波とが双対関係にある性質を利用したもので、一つの制御モーメントで二つの波動が同時に抑制できる特徴を有している。したがって、ABC 法と類似した効果を得るが、ABC 効果が完全な無振動状態を実現できるのに対し、アクティブ・シンク効果にはニアフィールドの影響が存在する。

6. 試作したモーメント・アクチュエータを用いて、状態制御法およびアクティブ・シンク法の効果を実験により確認した。

7. 非制御状態においては、構造減衰はその共振ピークの高さに大きく影響するが、アクティブ・シンク効果に対しては、損失係数 η が 0.0 から 0.05 程度の変化では、駆動点コンプライアンスにおいては全く影響を受けない。

文 献

- (1) Vaughan, D. R., *Trans. ASME, Ser. D*, June, (1968), 157.
- (2) Procopio, G. M. and Hubbard, J. E., 1987 *ASME Design Technology Conference*, (1987), 35.
- (3) von Flotow, A. H. and Shafer, B. E., *J. Guidance*, 9-6(1986), 673.
- (4) Mace, B. R., *J. Sound Vib.* 114-2(1987), 253.
- (5) 田中・菊島, 機論, 56-522, C(1990), 351.
- (6) 田中・菊島, 機論, 56-530, C(1990), 2575.
- (7) 田中・菊島, 機論, 58-546, C(1992), 360.
- (8) 田中・菊島・黒田, 機論, 57-541, C(1991), 2846.
- (9) 田中・菊島・黒田, 機論, 58-547, C(1992), 788.
- (10) Cowley, A., *Ann. C. I. R. P.*, 15-2(1969), 103.
- (11) 田中・ほか 2 名, 機論, 42-355(1976), 755.
- (12) 田中・ほか 4 名, 機論, 43-366(1977), 550.
- (13) 望月・ほか 2 名, 機論, 43-366(1977), 541.
- (14) Bailey, T. and Hubbard E., *J. Guidance*, 8-5 (1985), 605.
- (15) Crawley, E. F. and Luis, J., *J. AIAA*, 25(1987), 1373.
- (16) Clark, R. L., ほか 2 名, *J. Acoust. Soc. Am.*, 90-1(1991), 346.
- (17) 田中・ほか 2 名, 機論, 57-537, C(1991), 1548.
- (18) Noiseux, D. C., *J. Acou. Soc. Am.*, 47-1(1970), 221.