バイモルフ圧電アクチュエータを用いた 振動制御システムの検討

Study of Vibration Control System with Bimorph Piezoelectric Actuators

○池永健輔（立命館大, 院） 正 秋下貞夫（立命館大）

Kensuke IKENAGA and Sadao AKISHITA

Ritsumeikan University, 1-1-1, Noji-higashi, Kusatsu City, Shiga 525-8577, JAPAN

This paper describes the vibration control system utilizing bimorph piezoelectric actuators. Double panel system between which the bimorph piezoelectric actuators are installed is effective toward vibration reduction. The bimorph piezoelectric actuators are augmented in their strength of material by joining the soft metal plate to them. The design study of the strength of the actuator is conducted, and then the vibration transmission of the control system containing the actuators is estimated.

Key Words: Double panel, bimorph piezoelectric actuator

1 はじめに

振動を低減する受動的な方法として、二重隔壁を用いる方法が広く行われている。一方の隔壁で受けた振動を隔壁間に配置されたばねとダンパにより減衰させ、もう一方の隔壁への振動の伝達を遮断、もしくは緩和する方法である。しかしこの方法では低周波数領域における振動絶縁効果が一般に不十分であり、これを改善するために能動制御システムが導入される。

本研究ではバイモルフ圧電素子^[1]をアクチュエータとした二重隔壁構造を用いて、集合住宅などでの床の衝撃音や振動^[2]を低減するシステムをシミュレーションにより検討する。

2 振動伝達制御モデル

二重隔壁を用いた振動伝達制御モデル^[3]をFigure.1に示す。二重隔壁の上板は曲げ剛性の高いものを用いており、上板中央に設置された加振器により励起される振動振幅は法線方向の成分のみとする。上板が加振器により振動する際、二重隔壁間に設置したバイモルフ圧電アクチュエータにより、下板に生じる振動を低減する構造である。

バイモルフ圧電アクチュエータをFigure.2に示す。片持ちばりの自由端に発生する大きな変位を利用できるように圧電アクチュエータの一端は下板に固定し、他端は上板と回転自由な機構により結合されている。従ってアクチュエータに電圧が加えられ、曲げモーメントが発生すると上板と下板の距離を変化させるように力を作用し、下板の振

Figure 1: Double panel system

動を抑制できる仕組みとする。また速度センサを下板の中央に配置している。

Figure 2: Bimorph piezoelectric actuator

3 アクチュエータの補強

例えば、子供が飛び跳ねることによる衝撃を想定すると、圧電素子単体ではその衝撃荷重により破壊してしまう恐れがある。そこで両面に金属板を接着して圧電素子にかかる応力を緩和する構造にする。これを片持梁条件下で組合せはりとして以下の計算を行った (Figure.3)。

Figure 3: Combined beam

$i(i = 1, 2, 3)$ 番目の各部材の縦弾性係数、断面積をそれぞれ E_i , A_i とする。中心軸 NN から任意点までの距離を η とすると、梁の横断面上端から中心軸 NN までの距離 ξ は

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{\sum_{i=1}^n E_i \int (\xi + \eta) dA_i}{\sum_{i=1}^n E_i A_i} \\ &= \frac{E_1 h_1 (h_1 + 2h_2 + 2h_3) + E_2 h_2 (h_2 + 2h_3) + E_3 h_3^2}{2(E_1 h_1 + E_2 h_2 + E_3 h_3)} \end{aligned} \quad (1)$$

したがって作用する曲げモーメントを M , i 番目の部材の中心軸 NN に関する断面二次モーメント I_i をとすれば、各部での曲げ応力 σ_i は静加重を P として

$$\sigma_i = \frac{ME_i\eta}{\sum_{i=1}^n E_i I_i} = -\frac{PlE_i\eta}{E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3} \quad (2)$$

ただし、

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{bh_1\{h_1^2 + 3(h_1 + h_2 + h_3 - \xi)(h_2 + h_3 - \xi)\}}{3} \\ I_2 &= \frac{bh_2\{h_2^2 + 3(h_2 + h_3 - \xi)(h_3 - \xi)\}}{3} \\ I_3 &= \frac{bh_2\{h_3^2 - 3\eta(h_3 - \xi)\}}{3} \end{aligned} \quad (3)$$

このときのはりのたわみ y は境界条件を考慮して

$$y = \frac{Pl^3}{3(E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3)} \quad (4)$$

高さ d から子供が飛び跳ねる時にかかる各部の衝撃応力 δ_i は次式となる。

$$\delta_i = \sigma_i \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2d}{y}} \right) \quad (5)$$

子供の体重を 20[kg]、飛び跳ねる高さを 0.1[m]、両面に貼る金属板をアルミとし、繰り返し荷重がかかっても金属板・圧電素子ともに疲労破壊をしないように設計する^[4]と、寸法は 120[mm](長さ)×100[mm](幅)×12.4[mm](厚さ)となり、アルミ層、圧電素子の厚さはそれぞれ 4.1[mm]×2, 4.2[mm]である。またこのアクチュエータのばね定数 k は $k = 7.53 \times 10^6$ [N/m]である。これを 4 枚使用する。補強付きと補強無しのアクチュエータを同じ荷重条件で受ける曲げ応力の比較すると、衝撃荷重時では前者 60[MPa]、後者 506[MPa]となり圧電素子の破壊強度が 100[MPa]程度であることを考慮すると、後者は破壊してしまう。このことから補強板の効果は大きいと言える。

4 シミュレーションの結果と考察

Figure.1に示す振動伝達制御モデルの運動方程式は

$$m_1 \ddot{x}_1 = -c_1 \dot{x}_1 - k_1 x_1 - k(x_1 - x_2) + u + w \quad (6)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -c_2 \dot{x}_2 - k_2 x_2 - k(x_2 - x_1) - u \quad (7)$$

よって、状態方程式は状態ベクトル x を

$$x = [x_1 \ x_2 \ \dot{x}_1 \ \dot{x}_2]^T \quad (8)$$

として

$$\dot{x} = Ax + Bu + Dw \quad (9)$$

$$y = Cx \quad (10)$$

となる。ただし、

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1+k}{m_1} & -\frac{c_1}{m_1} & \frac{k}{m_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k}{m_2} & 0 & -\frac{k_2+k}{m_2} & -\frac{c_2}{m_2} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_1} \\ 0 \\ -\frac{1}{m_2} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T, D = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

入力を外乱 w 、出力を下板の変位 x_2 とする伝達関数 $G(s)$ は

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}D \quad (12)$$

制御入力 u を $u = -fx$ としたときの状態フィードバックゲインベクトル f を最適レギュレータ(重みを 5.0×10^{-9} に設定)により導出し、系に状態フィードバックを施すと

$$G(s) = C(sI - A + Bf)^{-1}D \quad (13)$$

となる。この時のボード線図を Figure.4 に、インパルス応答を figure.5 に示す。但し $m_1 = m_2 = 23.4$ [kg], $k_1 = 2.34 \times 10^5$ [N/m], $k_2 = 2.34 \times 10^4$ [N/m], $c_1 = 12$ [Ns/m], $c_2 = 60$ [Ns/m] とした。ボード線図より、制御前に比べ制御後は

Figure 4: Bode Diagram

Figure 5: Impulse Response

ピーク値を 10[Hz] 付近で 10[dB]、100[Hz] 付近では 50[dB] 下げることに成功している。またインパルス応答についても 1/3 の時間で収束していることが分かる。以上よりこの二重隔壁を用いた振動伝達制御システムは十分効果を発揮していると言える。

5 まとめ

補強したバイモルフ圧電アクチュエータを組込んだ振動伝達制御モデルを設計し、その制振効果をシミュレーションにより確認した。

References

- [1] 内野研二, 圧電/電歪アクチュエータ, 森北出版, 1986
- [2] 日本建築学会, 実務的騒音対策指針(応用編), 技報堂出版, 1987
- [3] 秋下 貞夫, 三谷 祐一郎, Philip.A.NELSON, 二重隔壁における騒音伝達の適応制御, 日本機械学会論文集(C編) 65巻632号 1999
- [4] 材料力学の学び方・解き方, 材料力学教育研究会, 共立出版, 1994