1501 スマート複合材料の振動制御に関する統合最適化

Multidisciplinary design optimization of smart composites for vibration control

○本田 真也 (北大)

成田 吉弘 (北大)

梶原 逸朗 (北大)

Shinya HONDA, Hokkaido Univ., N13, W8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido

Yoshihiro NARITA, Hokkaido Univ.

Itsuro KAJIWARA, Hokkaido Univ.

Key Words : Optimum design, Composite material, Smart structure, Vibration control

1. 緒 言

繊維強化複合材料は、その軽量で高剛性という特徴から、輸送機器を始め、様々な構造物の軽量化材料として利用されている。軽量化材料は特に厳しい振動状況下で用いられる場合が多く、繊維強化複合材に関する振動制御技術の重要性はますます高まっている。

本研究では、圧電素子を用いて複合材をスマート化し、その圧電素子配置、制御系、および複合材の積層構造を同時に最適化する。圧電素子による制御性能はその配置に大きく依存するため⁽¹⁾、制御系の設計と同時にその配置を最適に設計することが重要である。また、繊維強化複合材の振動特性は、各層の繊維配向角度(積層構成)に強く影響されるため、圧電素子配置および制御系と同様、重要な設計要素となる。本研究ではこれらを同時に最適化する統合最適化手法を提案する。

複合材のモデル化には有限要素法を用い、モード座標変換によりモデルの低次元化を行う。制御系は H_2 仕様に基いて設計する。初めに全ての設計候補(積層構成)に対する複合材の低次元モデルを算出し、データベースを作製する。それを参照しながら最適な圧電素子配置および状態フィードバックゲインを設計変数に含め同時に最適化する。その後、線形行列不等式(LMI)のアプローチにより、出力フィードバックの動的補償器を再構築する。最適化の結果、本手法により求めたスマート複合材は従来の一般的な積層構成を持つ複合材より優れた振動制御性能を示した。

2. 最適化手法

スマート複合材料の振動制御を目的とし、閉ループ系性能を向上すべく、統合最適化手法を提案する。積層複合材は、繊維を一方向に引き揃えた薄い直交異方性層(ラミナ)の繊維配向角度を変化させながら積層することで作製されるため、振動特性はその積層構成に大きく依存する。また、振動制御性能はそのアクチュエータ配置に強く影響されるため、積層構成、アクチュエータ配置、制御系を同時に設計する。本研究における最適化問題は以下のように定式化できる。

$$\begin{aligned} &\text{Minimizing: } J(\eta_L, \eta_c, \eta_{AC}) \\ &\text{Subject to: } g_c^{\min} \leq g_c(\eta_L, \eta_c, \eta_{AC}) \leq g_c^{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

最適化手法には単純遺伝的アルゴリズム(SGA)を用い、GA オペレータとして、二点交叉および一様突然変異を用いた。また、エリート戦略により解の収束性を高めた。

同時最適化問題では、 H_2 制御により閉ループ系を構成し、制御応答に関する H_2 ノルムを H_{z1} 、制御入力に関する H_2 ノルムを H_u として、目的関数 J および各設計変数に関する制約条件 g_c を以下のように定義する。

$$J = H_{z1}, \quad g_c = H_u \quad (2)$$

最適化問題(1)におけるそれぞれの設計変数は、 η_L が積層構成 $[\theta_1/\theta_2/\dots/\theta_k]s(k$: 対称積層数の半数)の参照番号を表し、各モード座標に重み付けを行う際の重み係数 η_c 、アクチュエータ配置を表す η_{AC} である。ここで、制御応答を z_1 として、各モード座標に直接重み付けすることによって、着目するモードを重点的に抑制する。

$$\begin{aligned} z_1 &= W_{10}q \\ W_{10} &= \text{diag}[w_1 \quad w_2 \quad \dots \quad w_{2r}] \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 q は状態量ベクトルであり、 r は採用モード数である。 η_{AC} は、アクチュエータの端点の節点番号を表す行列である。アクチュエータは幅 15mm の長方形の圧電素子を用いるが、最適化過程では線分と仮定し、制約条件として最大長さ $l_{\max} = 0.13$ m を与えた。また、複数の線分が交わる個体には、その目的関数値にペナルティを課す。

図 1 に本研究の最適化手順を示す。まず初めに設計候補となる全ての積層構成を有する複合材の低次元モデルを算出し、データベースとして保管しておく。続いて、状態フィードバックを仮定し、上記で作製したデータベースを参照しながら、積層構成、重み係数、アクチュエータ配置を同時に最適化する。その後、線形行列不等式(LMI)の手法により、出力フィードバックの動的補償器 $K(s)$ を再構築する。

Fig. 1 Design process of the present optimization.

3. 最適化結果と考察

最適化対象は、対称 8 積層 CFRP 平板をとし、材料定数を $E_1 = 141 \text{ GPa}$, $E_2 = 10.0 \text{ GPa}$, $G_{12} = 7.17 \text{ GPa}$, $\nu_{12} = 0.28$, $\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$ とする。試験片の寸法は $200 \times 160 \times 2 \text{ mm}^3$ である。採用モード数は第一次から五次までとした。モード重みは、 $\mathbf{W}_{10} = \text{diag}[1 \ 1 \ 1 \ 10^{-6} \ 10^{-6}]$ とし、第一次から三次までのモードを重点的に制御する。また制御入力に関する H_2 ノルムに関して $H_u \leq 0.1$ の制約を与えた。

アクチュエータ数を 1 から 4 個と変化した際のそれぞれの最適化結果を表 1 に、また得られたアクチュエータ配置を図 2 に示す。目的関数である制御応答に関する H_2 ノルム H_{z1} は、アクチュエータ数が増えるにつれて減少しており、アクチュエータ数が多い程、優れた制御性能が得られている。また、制約条件である H_u は、定めた上限にほぼ一致しており、得られた解が制約の中で最大限に制御性能を引き出していることが確認できる。

得られた最適な積層構成はアクチュエータが 3 つである場合を除き、全く同様であり、アクチュエータが 3 つの時も最内層以外は同様の配向角度である。積層板の曲げ変形に関しては、内層よりも外層が、曲げ剛性に影響することから、アクチュエータ数と積層構成には関連性が少ないことが分かる。

アクチュエータは、それぞれ水平軸に対して反時計回りに正の傾きを持って配置しており、全てに共通して得られた外層 2 層の最適な繊維配向角度 -15° とは交差する傾向にあることが分かった。

Table 1. Results of the multidisciplinary design optimization for the plate with different numbers of actuators.

No. of AC	H_{z1} ($\times 10^{-7}$)	H_u	q_w ($\times 10^7$)	Opt. lay-up
1	6.01	0.10	2.60	[-15/-15/0/-45]s
2	4.42	0.10	3.50	[-15/-15/0/-45]s
3	3.90	0.098	4.00	[-15/-15/0/90]s
4	3.27	0.098	6.00	[-15/-15/0/-45]s

Fig. 2 Optimum actuator placements for the plates with optimized lay-ups.

Fig. 3 Closed-loop FRF for the optimized plate [-15/-15/0/-45]s with the optimum actuator placements (AC = 2) and control system (the 1st, 2nd and 3rd modes are controlled).

Table 2 Results of the actuator placement optimization for typical lay-up configurations with two actuators.

H_{z1} ($\times 10^{-7}$)	H_u	q_w ($\times 10^7$)	Typical lay-up
6.26	0.099	2.40	[0/0/0/0]s
21.9	0.091	0.500	[45/-45/45/-45]s
8.15	0.096	1.60	[0/45/-45/90]s
8.18	0.97	1.60	[0/90/0/90]s

図 3 にアクチュエータ数が 2 の場合の閉ループ系の周波数応答関数(FRF)を示す。図 3 より、重みを課した第一次から三次までのモードのピークが大きく低減されていることが分かる。

積層構成を代表的な 4 つ [0/0/0/0]s, [45/-45/45/-45]s, [0/45/-45/90]s, [0/90/0/90]s に固定し、2 つのアクチュエータ配置と制御系のみを最適設計した際の結果を表 2 に示す。最も低い H_{z1} を与えたのは、[0/0/0/0]s であり、その値は $H_{z1} = 6.26 \times 10^{-7}$ であった。これは本統合最適化手法で求めたアクチュエータ数 2 の場合に得られた $H_{z1} = 4.42 \times 10^{-7}$ よりも大きな値である。また、得られた FRF より第三次のピークの低減量が本手法で得られた結果と比較して小さくなる結果が得られた(図省略)。以上により、本報で提案した複合材スマート構造の振動制御性能の向上を目的とした統合最適化手法が効果的であることが示された。

4. 結 言

本研究では圧電素子により複合材積層板をスマート化し、振動制御性能の向上を目的として、統合最適化手法を提案した。はじめにモードおよび振動数に関するデータベースを作製し、状態フィードバックを仮定して SGA により統合最適化を行った。その後、出力フィードバックの動的補償器を再構築した。最適設計の結果、本手法は従来の典型的な積層構成を持つ板よりも優れた振動制御性能を示すことがわかった。

参考文献

- (1) Ono, K., Kajiwar, I. and Ishizuka, S., *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 43, No. 1-4 (2007), pp. 184-199.