応答曲面法と遺伝的アルゴリズムを用いた CFRP アイソグリッド構造の最適設計

日大生産工(院) 〇鈴木 崇司 日大生産工 坂田 憲泰 日大生産工 邉 吾一

1. 緒言

アイソグリッド構造とは、正三角形の格子状の 補強材と表板から構成される軽量薄肉構造であり、 特に軽量化と強度が要求される航空宇宙分野に応 用されている.金属製アイソグリッド構造の製造 技術は確立されており、使用例にロケットのペイ ロードフェアリングや燃料タンク、ISS 日本実験 棟「きぼう」の与圧壁が挙げられる.著者らはこれ までに3軸のフィラメント・ワインディング装置 とシリコーンゴムを使った CFRP アイソグリッド 円筒殻の一体成形技術を構築した.また、静的軸 圧縮試験を行い、軸圧縮に対するアイソグリッド 補強の効果示し、破壊様相は弾性局所座屈と材料 破壊となった¹⁾.座屈メカニズム解明のために FEM 解析を行ったところ、実験結果と良く一致し 解析モデルの有用性を示した²⁾.

本研究では、応答曲面法と遺伝的アルゴリズム を組み合わせた最適化手法を用い、規定荷重を設 けた場合の座屈と材料破壊を考慮した CFRP アイ ソグリッド円筒殻の重量最小化問題の最適化を行 った結果について報告する.

2. 最適設計

2.1 最適化問題の定式化

CFRP アイソグリッド円筒殻の重量最小化問題 を式(1)のように定式化した.規定荷重を[P_s], 座屈荷重を[P_b],材料破壊荷重を[P_M]としたとき, [P_b]と[P_M]が[P_s]を超える制約条件を設けた.前述 の通り,CFRP 製のアイソグリッド円筒殻は表面 層と補強材からなる構造で,それぞれに検討しな ければならない設計変数が存在する.表面層は積 層数,積層角度の二つが変数となるが,本研究で はアイソグリッドの補強効果に着目するために積 層数は2層と固定し,積層角度を[x₁]とした.グリ ッド補強材ではフープ補強材とヘリカル補強材の 幅と厚さ(積層数)は同一であるとし,それぞれ [x₂], [x₃]とした.アイソグリッドの形状を保つた めにヘリカル補強材の角度は 30°に固定し,円筒 殻の内径を110 mm,軸長を150 mm とした.



2.2 最適化手法

最適化計算のフローチャートを Fig.1 に示す. はじめに,目的関数や設計変数などの最適化問題 を定義し,FEM 解析を用いて座屈荷重,材料破壊 荷重,重量に関するサンプリング計算を行った. 計算点は実験計画法のD最適規準に準じて設計空 間内から142点を選択した.CFRP アイソグリッ ド円筒殻は形状や荷重条件が周期対称性を有して いるため,45°を基本セクターとする周期対称解析 を行い,座屈荷重については計算コストの観点か ら線形値を用い,材料破壊荷重は複合材料の破損 則であるTsai-Wu 則によって判定した.

142 点のサンプリング計算によって得られた設計変数とその応答から、応答曲面法を用いて設計変数に関する3つの近似関数を作った.応答曲面





Takashi SUZUKI, Kazuhiro SAKATA and Goichi BEN

Table 1 Optimization results

Constraint	Des	sign variables		GA			FEM		
Prescribed load	<i>X</i> 1	<i>x</i> 2	<i>X</i> 3	Buckling load	Material failure	Weight	Buckling load	Material failure	Weight
[kN]	Winding angle [deg]	Width [mm]	Thickness [ply]	[kN]	load [kN]	[N]	[kN]	load [kN]	[N]
60.0	44.9	2.06	14	61.2	66.2	0.594	62.1	63.7	0.595
90.0	45.2	3.65	15	90.7	92.8	0.933	90.1	94.5	0.927
120.0	43.8	5.70	17	122.6	125.3	1.434	121.5	124.4	1.433

法とは、設計変数とその応答の関係が具体的な関 数形で与えられていない問題に対して、設計変数 と応答から近似関数を与える最適設計手法である. いずれの近似関数も2次の多項式で基底した.現 問題での応答は座屈荷重と材料破壊荷重、重量の 3つである.重量に関しては[x2]と[x3]に線形的に 増減すると考えられたため、係数の決定には最小 二乗法を用いて近似関数を作った.座屈荷重と材 料破壊荷重については設計変数の組み合わせによ り非線形性を示し、多峰性解空間になると考えら れた.そこで、近似精度を向上するために係数の 決定には以下に示す移動最小二乗法(Moving least-squares method, MLS 法)を用いた.

$$y(x) = a_{0} + a_{1}x_{1} + a_{2}x_{2} + a_{3}x_{3}$$

+ $a_{4}x_{1}^{2} + a_{5}x_{2}^{2} + a_{6}x_{3}^{2} + a_{7}x_{1}x_{2} + a_{8}x_{1}x_{3} + a_{9}x_{2}x_{3}$
= $p(x)^{T}a(x)$
= $p(x)^{T}A^{-1}(x)B(x)u$ (2)

$$\begin{cases} p(x_{i}) = \{1, x_{i,i}, x_{2,i}, x_{3,i}, x_{1,i}^{T}, x_{2,i}^{T}, x_{3,i}^{T}, x_{1,i}x_{2,i}, x_{1,i}x_{3,i}, x_{2,i}x_{3,i}\} \\ A(x) = \sum_{i=1}^{N} w(r_{i}) p(x_{i}) p(x_{i})^{T} \\ B(x) = \{w(r_{i}) p(x_{i}), w(r_{2}) p(x_{2}), \cdots, w(r_{N}) p(x_{N})\} \\ w(r_{i}) = 1 - 6(r_{i} / \rho)^{2} + 8(r_{i} / \rho)^{3} - 3(r_{i} / \rho)^{4} \\ u = \{u_{1}, u_{2}, \cdots, u_{N}\} \end{cases}$$

ここで, y(x)はMLS法によって与えられる近似値, p(x)は基底関数, w(r)は重み関数であり, r_iは計算 点と評価点の距離, ρは影響半径, u は各計算点の 応答値ベクトル(座屈荷重もしくは材料・破壊荷重) を表す.重み関数には4次スプライン関数を用い, 計算点と評価点の距離の計算にはノルムを用いた. 影響半径はノルムが小さい順に 12 点の計算点を 参照した. MLS法は評価点近傍(影響半径内)の 計算点のみを参照して評価点ごとに近似関数の係 数を決定することで近似精度を向上させている.

近似関数の最適値を見つけるアルゴリズムには 遺伝的アルゴリズム(Genetic algorithm, GA)を用 いた. GA とは自然淘汰のメカニズムを模倣した アルゴリズムで、局所勾配を用いず近似関数上で 多点探索を行うので大域的な最適解を得ることが 可能なアルゴリズムである. GA では、集団の大 きさを50,世代数を300,変数ごとに一点交叉を 行うこととし、交叉率は50%、突然変異率は3% とした.全世代数が終了したときに最小重量を示 した個体を暫定最適解として出力した.

暫定最適解の応答を確認するために暫定最適解 の仕様でFEM解析を行った.FEM解析と暫定最 適解の誤差が5%以内であれば最適解として出力 し、5%以上の場合は、近似精度向上のために暫 定最適解近傍のサンプリング計算点を追加して応 答曲面の更新を行った.

3. 最適化結果

規定荷重を 60.0 kN, 90.0 kN, 120 kN としたと きの最適化結果を Table 1 に示す. いずれの結果に おいても制約条件を満足しており,材料破壊荷重 が座屈荷重を上回る結果となった. FEM 解析との 誤差は 3.87%以内となり,高い近似精度で最適化 計算が行われたと考えられる.また,積層角度は 43~45°付近に集中しており,規定荷重を大きくし ていくにつれて,幅と厚さが同時に大きくなる傾 向を示した.

4. 結言

規定荷重のもと、座屈と材料破壊を考慮した CFRP アイソグリッド円筒殻の重量最小化問題の 最適化を行った結果、以下の結論が得られた.

- 1) 多峰性解空間の近似手法として, MLS 法が有 用であることを示した.
- 2) 積層角度は規定荷重によらず43~45°付近を示し、幅と厚さを同時に大きくすることで規定荷重を満足し、重量を最小にしていることがわかった.

「参考文献」

- Goichi Ben, et al., "Axial Compressive Behaviors of CFRP Isogrid Cylindrical Shells", Proceedings of the 6th Korea-Japan Joint Symposium on composite Materials, 156-157, 2007
- Goichi Ben, et al., "Nonlinear Buckling Analysis of CFRP Isogrid Cylindrical Shells", Proceedings of ICSV15, 2008