

アイソグリッドCFRP円筒殻の最適構造設計

日大生産工（院） ○望月裕太 日大生産工 邊 吾一
日大生産工 坂田憲泰

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部、ISS日本実験棟「きぼう」の与圧壁が挙げられる。

Al合金材を用いてアイソグリッド構造を有する円筒殻を成形するためには、正方形板のAl合金から正三角形の格子状補強材部分を残して、薄板になるまで切削を行い、曲面板に加工して最後にそれらを溶接して円筒殻を製造する。したがって金属材料で製造すると、材料の使用効率が悪い、製造工程が多いなどの問題がある。

本研究では、アイソグリッド円筒殻を比強度・比剛性に優れるCFRPによって一体成形し、前述の問題を解消する。また、アイソグリッドCFRP円筒殻には多くの設計変数が存在するため、設計変数を最適値にする最適構造設計を行う。

2. 静的軸圧縮試験

アイソグリッドCFRP円筒殻はFilament Winding装置を用いて成形した¹⁾。材料は一方向炭素繊維トウプレグを使用した。試験体の種類は、表面層の巻き角度が60°と90°（以下60°をIso-60、90°の場合をIso-90と呼ぶ）の2種類とした。

試験機にはオートグラフを使用し、試験体軸方向に均等に負荷をかけられるように球座式圧盤を用いた。負荷速度は0.5[mm/min]とした。ひずみは試験体外表面の胴部に二軸ゲージを180°間隔に2箇所、試験体外表面以外に一軸ゲージをヘリカル方向補強材に3箇所、フープ方向補強材に2箇所貼り、計9chでひずみを計測した。試験体の寸法平均値をTable 1に示す。

Table 1 Average Size of Test Shells

	Iso-60	Iso-90
Shell Length [mm]	135.1	137.5
Inner Diameter [mm]	110.8	108.5
Plate Thickness [mm]	0.6	0.8
Stiffener Width [mm]	2.2	2.0
Stiffener Height [mm]	3.2	2.5

3. FEM解析

解析には汎用有限要素法プログラムのANSYS ver.11.0を使用した。CFRPアイソグリッド円筒殻は45°おきに周期対称性を持つ構造である。また、境界条件も周期対称性を有していることから、アイソグリッド円筒殻は基本セクタだけをモデル化する周期対称モデルとし、周期対称モデルによる解析では重合セクタ法を用いることで、360°モデル化するフルモデルに対し、1/4領域のモデルとなる。境界条件は軸方向に両端単純支持とする。非線形解析では変位制御で行う。また、使用材料物性値と材料強度値はTable 2に示す。

Table 2 Material Properties and Material Strength of CFRP

		Tensile	Compressive
Longitudinal Modulus [GPa]	Ex	142	129
Transverse Modulus [GPa]	Ey	8.3	9.3
	Ez	8.3	9.3
Shear Modulus [GPa]	Gxy	4.2	
	Gyz	3.3	
	Gxz	4.2	
Poisson's Ratio	ν_{xy}	0.32	
Longitudinal Strength [MPa]	Fx	2950	1570
Transverse Strength [MPa]	Fy	79	190
Shear Strength [MPa]	Fxy	140	

4. 解析モデルの評価

Fig.1はアイソグリッドCFRP円筒殻の荷重軸変位線図を表している。Iso-60、Iso-90共に実験値とFEM解析値の剛性はよく一致している。

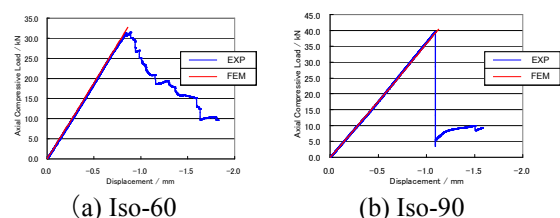


Fig.1 Load-Displacement Curves for Experimental and FEM Results

Optimum Structural Design of Isogrid CFRP Cylindrical Shell

Yuta MOCHIZUKI, Goichi BEN and Kazuhiro SAKATA

次に、試験と解析から構造の破損および座屈判定を行う。破損判定基準を次のように設定した。幾何学的非線形解析によるグリッドで囲まれた表面層のひずみが急激に変化する時の荷重(以下、局所座屈荷重と呼ぶ)と、複合材の破損則Tsai-Wu則を適用した時の材料破損荷重、また固有値座屈解析による固有値座屈荷重の計3つを出力し、試験値との比較を行った。比較結果はTable 3に示す。

Table 3を見ると、Iso-60では局所座屈荷重が試験結果と近い値を示した。その座屈箇所は試験、解析共にグリッドで囲まれた表面層で局所的に座屈していた。これよりIso-60は表面層で局所座屈が生じたと考えられる。Iso-90では材料破損荷重が試験結果と近い値を示した。その破損箇所は試験、解析共にグリッドのオフセット部で破損していた。これよりIso-90はオフセット部で材料破損したと考えられる。

Table 3 Comparison of Experimental Results with FEM

	Experimental Value [kN]	Result of the Finite Element Analysis		
		Local Bucking Load [kN]	Material Failure Load [kN]	Linear Bucking Load [kN]
Iso-60	30.7	32.0	38.2	71.5
Iso-90	37.8	42.0	40.2	80.6

5. 最適構造設計

5.1 最適化問題の定式化

最適化問題の定式化を行うと、以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 &\text{find} && x = [x_1, x_2, x_3] \\
 &\text{minimize} && W \\
 &\text{subject to} && \begin{cases} N \geq 60 & [kN] \\ 0 < x_1 < 90 & [^\circ] \\ 1 \leq x_2 \leq 7 & [mm] \\ 1 \leq x_3 \leq 8 & [ply] \end{cases}
 \end{aligned}$$

Wは構造の重量である。Nは座屈荷重を示す。アイソグリッドCFRP円筒殻には多くの設計変数が存在する。よって今回は設計変数を以下の3つに絞った。表面層積層角度 $[x_1]$ 、補強材幅 $[x_2]$ 、補強材積層数 $[x_3]$ 。その他の変数は一定値とした。また制約条件は座屈荷重と設計変数を前述の範囲で設定し、重量を最小値にする問題とした。

5.2 応答曲面法

応答曲面法(Response Surface Method 以下RSM)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、近似関数を与える最適設計法である²⁾。現問題での応答は重量と座屈荷重である。重量は設計変数によって単純に増減すると考えられるが、座屈荷重は表面層の変数 $[x_1]$ と補強材の変数 $[x_2, x_3]$ の相互作用によって多峰性を示すと考えられる。そこで重量は二次多項式で近似し、

座屈荷重は移動最小二乗法(以下MSLM)を用いて近似精度の向上を図った。

5.3 最適化手順

最適化アルゴリズムは遺伝的アルゴリズム(以下GA)と模擬焼きなまし法(SA)を適用した。以下に最適化の手順を示す。

- (I) 実験計画法に基づいて初期の計算点を設定し、構造重量、座屈荷重についての各応答曲面を構成する。
- (II) 応答曲面を用い最適化計算(GA または SA)を行い、暫定最適解を求める。
- (III) 暫定最適解において FEM を実施し、暫定最適解とFEMの応答を比較し近似誤差が5[%]以内かどうか収束判定を行う。
- (IV) 収束基準を満たした場合、その暫定最適解を真の最適解とする。一方満たさない場合、新たに計算点を追加後、各応答曲面の更新を行い、手順IIに戻る。

5.4 最適化結果

最適化結果と応答曲面の近似誤差をTable 4に示す。Table 4より、GAによる解がより重量の低い解となった。また、MSLMの有用性を確かめるために、四次多項式による応答曲面とMSLMによる応答曲面の500個のランダム点の近似値とFEMの応答値を比較した。その結果、四次多項式近似による平均誤差は7.0[%]となった。またMSLMによる平均誤差は3.71[%]となり、MSLMの近似精度が高いことが確認できた。

Table 4 Optimization results

		GA,RSM	Error	SA,RSM	Error
Weight [g]	Approximate value	50.90	0.68	42.79	19.52
	Correct answer value	50.56		53.17	
Buckling load [kN]	Approximate value	62.12	1.59	67.37	1.54
	Correct answer value	61.15		68.43	
Fiber orientation angle [°]		64.7		4.0	
Width of grid [mm]		1.11		2.24	
Number of layers		8		5	

6. 結言

- 試験と解析の結果を比較することで解析モデルの有用性を示すことができた。
- 応答曲面の作成方法に移動最小二乗法を用いることで、近似精度の向上を図ることができた。

参考文献

- 1) 邊,岸谷 : アイソグリッドで補強された CFRP 円筒殻の開発,構造強度に関する講演会講演集,(2007), 157.
- 2) 山崎光悦 : 応答曲面法の展開,日本機械学会誌,109,1050(2006),39