

半陰解法を用いた複合材円筒殻の非線形座屈解析

日大生産工(院) ○福島 誠人 日大生産工 平山 紀夫
サイバネットシステム(株) 山本 晃司 サイバネットシステム(株) 佐々木 隆宏

1. 緒言

比強度や比剛性に優れる繊維強化プラスチック (FRP) の構造体では、軽量化のために薄肉のシェル構造が採用されることが多い。そのため、構造設計では薄肉のシェル構造の座屈現象を回避することが重要である。特に、薄肉円筒殻は板厚が非常に小さいため、初期不整に対して敏感であり、また、荷重の作用状況によっては複雑な座屈現象が生じる。そのため、FEM 解析等の数値解析を用いても精度の高い予測が困難である。

本研究では、薄肉円筒殻の複雑な非線形座屈問題に対して、静解析と動解析を自動的に切り替える半陰解法を適用し、その有用性の検証を行った。

2. 解析方法

2.1 解析モデル

本研究では、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の静的な座屈実験を行った Bisagni¹⁾ の実験を参考に解析を実施した。本研究の解析には、汎用有限要素法ソフト ANSYS R1 を用いて解析を実施した。本解析に用いた要素は4節点構造シェルの SHELL181 を用いており、円筒の周方向を200分割、軸方向を65分割し、節点数は15200、要素数は15000である。解析モデルは、Bisagni の実験に用いられた円筒を参考にし、内半径250mm、全長520mm、一層当たりの板厚を0.125mmとした。また、このときのCFRPは、積層数を4層とし、合計板厚は0.5mmであり、この時の積層構成は対称積層の [45/-45]_s とした。解析に使用した材料物性値をTable1に示す。

2.2 境界条件

次に、解析の境界条件として、円筒の下端の変位を完全拘束し、上端については高さ方向の変位は拘束せず、それ以外の変位は拘束した。また、円筒の上端については、すべての節点が、高さ方向について同様の挙動を示すように拘

束方程式により拘束し、独立節点に対して16mmの変位を負荷し解析を実施した。

2.3 解析手法

本解析では、半陰解法 (Semiimplicit method) と他の解析手法を比較するため、半陰解法手法のほかに従来から非線形座屈解析に用いられてきた弧長法 (Arc length method) でも解析を実施した。

2.4 初期不整

実際の構造物は、製作時の過程で何らかの初期不整を有しており、特に薄肉円筒の場合は、初期不整に対して鋭敏であり、初期不整の多寡で座屈荷重がばらつくことが知られている。本研究では、初期不整を、初期形状の線形座屈固有値解析により得られた最初の座屈固有モードの最大変位が板厚に対して1%, 3%, 5%, 10% になるように与えた。このときの初期不整として与えた、線形座屈固有値解析により得られた座屈固有モードをFig.1に示す。また、この時の座屈荷重係数は23.77[kN]であった。

Table1 Material properties.

Properties	Units	Value
Longitudinal modulus (E_L)	GPa	150
Transverse modulus (E_T)	GPa	9.08
Longitudinal Poisson ratio (ν_{LT})	-	0.32
Longitudinal shear modulus (G_{LT})	GPa	5.29
Density (ρ)	g/cm^3	1.57

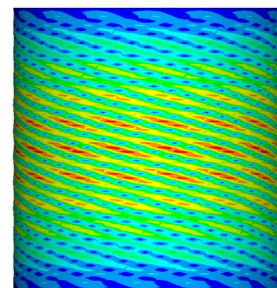


Fig.1 Buckling mode of eigen value analysis.

Nonlinear buckling analysis of composite cylindrical shells using semiimplicit method

Makoto FUKUSHIMA, Norio HIRAYAMA, Koji YAMAMOTO and Takahiro SASAKI

3. 解析結果

Fig.2に半陰解法と弧長法による座屈荷重と初期不整の値の関係を示す。また、Table2にBisagniの実験における座屈後の変形過程を示した写真と本解析によって得られた初期不整が10%のときの半陰解法で得られた座屈後挙動の解析結果を対比した表を示す。

まず、Fig.2については半陰解法と弧長法ともに初期不整が増加するにつれ座屈荷重は低下していったが、実験値ほど低下するには至らなかった。これは、実際の実験では、板厚の初期不整のほかに、円筒に荷重を負荷する際の荷重の偏りなどの実験的な不備や、CFRP内部に発生しているボイドや強化繊維を配向する際に生じる成形時の繊維のよれなどの材料的な欠陥。そして、強化繊維と母材樹脂の間に生じる界面での破壊など、多岐にわたる要因により実験値はFEM解析によって得られた座屈荷重より大幅に低下していると考えられる。また、それぞれの解析手法の比較については、弧長法は半陰解法よりも低い座屈荷重を示しているが、これは弧長法による解析が解析の途中で収束しきれずに解が発散したため見かけ上低い数値が得られたと考えられる。そのため、弧長法では座屈後挙動は得られなかった。

次にTable2に示す座屈後挙動であるが、図に示すように、本解析で得られた座屈後挙動は、Bisagniの実験で得られた座屈後挙動と比較的類似した挙動が得られた。実験では座屈点を通過後、45度方向に3段のダイヤモンドバックリングが発生し、それらが徐々に合体していき大きなダイヤモンドバックリングとなるが、本解析で得られた変形も同様の挙動を示した。

4. 結言

Bisagni の実施した実験を参考に複合材円筒殻の非線形座屈解析を半陰解法と弧長法を用いて解析した結果、以下の知見が得られた。

- 1)弧長法で得られる解析終了時の荷重は、実際の座屈荷重に比し高い値となった。また、弧長法では解析の途中で解が発散したため、座屈後挙動は得られなかった。
- 2) 半陰解法による解析は弧長法と同様に実験値に比し高い座屈荷重となった。しかし、弧長法とは異なり解は発散せず座屈後挙動を得ることができた。また、得られた座屈後挙動は、実際の実験での座屈後挙動に類似した変形挙動を示した。

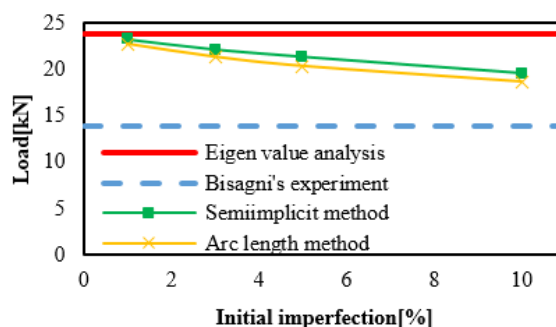


Fig.2 Relationship between buckling load and initial imperfection of each method.

Table2 Bisagni's experimental photograph and deformation figure obtained by FEM analysis.

Displacement at the observation point	Bisagni's experiment	FEM analysis
Near buckling point		
4.02mm		
8.22mm		
15.55mm		

参考文献

- 1) C.Bisagni, "Composite cylindrical shells under static and dynamic axial loading:An experimental campaign",Progress in Aerospace Sciences 78 (2015) 107-115.
- 2) ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 2019 R1, Help System, Coupled Field Analysis Guide, ANSYS, Inc.