

OS0308 液体圧を受けるクロスプライ積層円筒殻の軸圧縮座屈解析

An Analysis of Axial Compressive Buckling of Cross-Ply Laminated Cylindrical Shells under Liquid Pressure

○学 齋藤 暢俊 (東海大院) 正 藤田 征樹 (日立建機)
 正 菊川 久夫 (東海大) 正 粕谷 平和 (東海大)

Nobutoshi SAITO, Tokai University, 1117 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa
 Masaki FUJITA, Hitachi Construction Machinery Co.,Ltd.
 Hisao KIKUGAWA, Tokai University
 Hirakazu KASUYA, Tokai University

Key Words: Structural Analysis, Composite Materials, Laminated Cylindrical Shells, Buckling, Axial Compressive Load, Liquid Pressure, Finite Element Method

1. 緒言

炭素繊維からなる高性能繊維強化プラスチック材 (CFRP) は、比強度、比剛性に優れ、構造部材の軽量化を可能にするとともに、与えられた形状寸法、負荷形態を考慮した最適設計が可能な材料である。このため、航空・宇宙機器をはじめとするさまざまな分野の構造物に用いられている。そこで、各種荷重が作用する複合材料積層円筒殻の座屈現象を把握する必要が生じ、数例の解析的研究の報告がなされている^{(1),(2)}。

現在、複合材料の用途拡大に伴い、複合材料積層円筒殻は燃料タンクなど気体および液体貯槽構造物への使用が進んでいる。このような構造物をより広範囲に用いるために力学的特性を解明することは、貯槽される物質の特性や安全性の観点から極めて重要である⁽³⁾。

そこで本報告では、内部から液体圧を受けるクロスプライ積層円筒殻の軸圧縮座屈現象に関して、有限要素法 (FEM) を用いて座屈固有値解析を行い、積層円筒殻の形状寸法、積層構成、液体圧などの各諸因子が座屈値に及ぼす影響について検討する。

2. 数値解析および解析モデル

解析モデルとして、Fig.1 に示すような半径 R 、筒長 L 、板厚 h 、液位 H の液体を有するクロスプライ積層円筒殻が軸圧縮荷重 P を受ける場合を考える。液体圧 $p_{(x)} (= \rho_f g H)$ は円筒殻内部側面に作用するものとする。座標原点を円筒

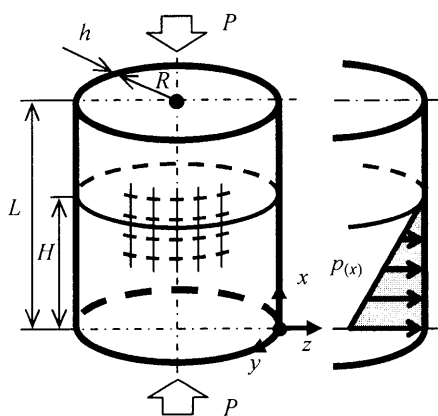


Fig.1 Configuration and coordinates of cross-ply laminated cylindrical shell.

中央にとり、円筒軸方向、円周方向、板厚方向にそれぞれ x, y, z 軸をとる。

本報告では、Koiter-Sanders のシェル理論が用いられており、任意の形状や荷重条件および境界条件による連続体内の面内・面外解析に適用できる非線形構造解析汎用プログラム MSC / Marc を使用して、積層円筒殻の座屈固有値解析を行う。解析モデルの要素には、四辺形薄肉線形シェル要素を用いた。

3. 数値計算例とその検討

数値解析例として、円筒殻材料には繊維容積含有率 $V_f = 60$ [%] の炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を想定し、材料定数を Table 1 に示す。この材料定数は平均化近似解法によって計算され、実験でも確認された値である⁽⁴⁾。本計算例では、全板厚 h 一定のもと各構成層は等厚とし、積層数 N が奇数である対称クロスプライ積層とし、また最内層積層角 θ は円筒軸方向を基準として扱う。

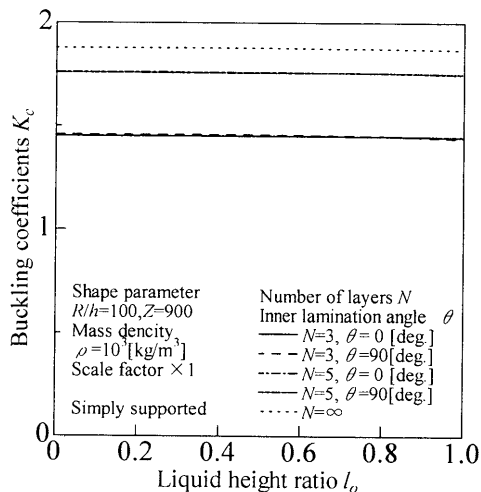
液体圧を受けるクロスプライ積層円筒殻の軸圧縮による座屈値 $\sigma_c (= P_c / 2\pi R h)$ を無次元座屈係数 $K_c (= \sigma_c R / E_f h)$ とし、液体圧を受けない場合の無次元座屈係数を K_{co} として表す。そして K_c と K_{co} の比を座屈荷重比 K_c / K_{co} とする。

液体圧を受ける状況下のクロスプライ積層円筒殻の軸圧縮座屈を想定するにあたり、円筒殻内部の液体密度、重力加速度および液位が重要である。一例として、液体密度が $\rho_f = 10^3$ [kg/m³] および 10^4 [kg/m³] の場合について検討する。また、重力加速度 $g = 9.807$ [m/s²] とし、これにより液体圧 $p_{(x)}$ は H の関数として与えられる。本検討では、形状パラメータ $R/h = 100$ 一定のもとで $Z (= L^2 / R h) = 900$ において、 $L = 0.3$ [m] を寸法倍率 1 倍と定義し、積層円筒殻の形状寸法倍率が 1 倍から 5 倍となる場合について検討する。

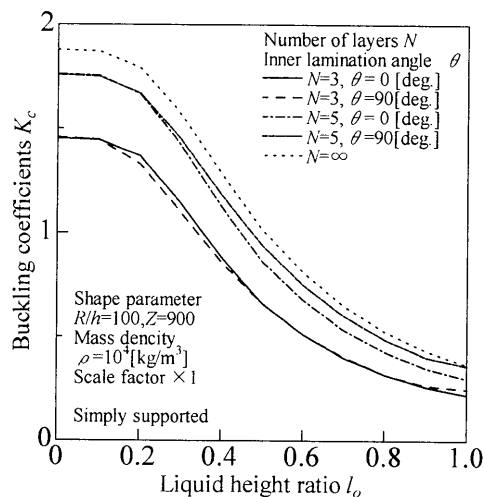
数値計算例より、液位比 $l_0 (= H / L)$ の変化による K_c および K_c / K_{co} の影響を検討し、Fig.2 に積層構成を変化させた場合の K_c と l_0 の関係を、Fig.3 に寸法倍率を変化させた場合の K_c / K_{co} と l_0 の関係を示す。Fig.2, Fig.3 とともに (a) は $\rho_f = 10^3$ [kg/m³]、(b) は $\rho_f = 10^4$ [kg/m³] の結果を示す。

Table 1 Material constants of CFRP ($V_f=60$ [%])

E_T [GPa]	E_L [GPa]	G_{LT} [GPa]	ν_L	ν_T
137	8.17	4.75	0.316	0.0189

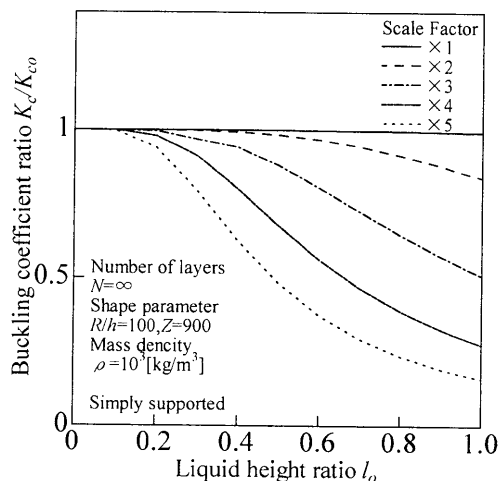


(a) Scale factor $\times 1$, $\rho_f = 10^3$ [kg/m³]

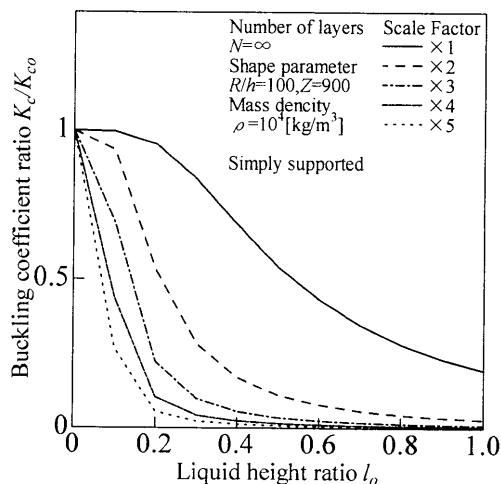


(b) Scale factor $\times 1$, $\rho_f = 10^4$ [kg/m³]

Fig.2 Variation of buckling coefficients K_c of cross-ply laminated cylindrical shells with liquid height ratio l_0 .



(a) $\rho_f = 10^3$ [kg/m³]



(b) $\rho_f = 10^4$ [kg/m³]

Fig.3 Variation of buckling coefficient ratio K_c/K_{c0} of cross-ply laminated cylindrical shells with liquid height ratio l_0 .

(1) 液位による影響

積層円筒殻が内部から液体圧を受けると液位 H による $p_{(x)}$ が作用するため、 K_c および K_c/K_{c0} は低下する。また、 l_0 の増加に伴い K_c および K_c/K_{c0} は減少する傾向を示す。 $\rho_f = 10^3$ [kg/m³] の場合や円筒殻の寸法倍率 1 倍の場合では、液位変化による K_c および K_c/K_{c0} の変化は極めて小さい。しかし、液体密度と円筒殻の寸法倍率の増加に伴い座屈値の低下傾向は顕著に示される。

(2) 円筒殻の寸法倍率の影響

積層円筒殻の寸法倍率の増加が、液体圧を受ける状況下における座屈値に大きく影響を与える。寸法倍率が 1 倍では液位変化による K_c/K_{c0} の低下は小さく、液体圧の影響は少ないと考えられる。また、 $\rho_f = 10^4$ [kg/m³] の場合では液体圧の影響が大きくなるため、 K_c/K_{c0} の低下が著しい。円筒殻の寸法倍率の増加によって円筒殻の容積が増加するため、液体量の増加により内圧の最大値が増大し、座屈値に大きな影響を与えられられる。

(3) 積層順序による影響

積層円筒殻の積層順序により、座屈値の低下傾向が異なる。最内層積層角 $\theta = 0$ [deg.]、 $\theta = 90$ [deg.] を比較すると、液位比 l_0 が小さい場合では $\theta = 0$ [deg.] で K_c が高くなり、 l_0

の増加に伴い $\theta = 90$ [deg.] で高い K_c を示す。これらの傾向は、 $\theta = 0$ [deg.] 層が多い場合では軸方向に高い剛性値を示し、 $\theta = 90$ [deg.] 層が多い場合では円周方向に高い剛性値を示すためと考えられる。

4. 結言

本報告では、液体圧を受けるクロスプライ積層円筒殻に軸圧縮荷重が作用したときの座屈固有値解析を FEM を用いて行い、積層円筒殻材料は代表的な CFRP 材を想定し、各諸因子が座屈値に及ぼす影響について検討した。

積層円筒殻内の液体密度、液位変化、円筒殻の形状寸法および積層構成などが座屈特性に及ぼす影響について明らかにした。また、液体圧を受ける積層円筒殻の場合、液体密度および円筒殻の寸法変化が軸圧縮座屈現象に大きく影響することを示した。

文献

- (1) 根本・粕谷・山岸, 機論, **69**-679, A(2003), 545.
- (2) 粕谷・根本・森住・宇田, 設計工学, **42**-5(2007), 277.
- (3) 藤田・大野・菊川・粕谷, 機講論, 070-4(2007), 237.
- (4) 植村・山田, 材料, **24**-257, (1975), 156.