

光学的全視野変位計測を用いた軸圧縮荷重を受ける円筒シェルの座屈実験

長崎大学 学生会員 ○上妻隼人 長崎大学大学院 学生会員 森下喬 長崎大学 正会員 松田浩
 長崎大学 非会員 濱端麻衣 長崎大学大学院 学生会員 古屋瞬 長崎大学 非会員 山下務

1. はじめに

円筒シェルは、貯蔵庫、圧力容器、航空機や屋根構造、あるいは建設工事におけるケーソンなどの広い分野で用いられている。それゆえ、円筒シェルに軸圧縮、曲げ、せん断、ねじり、内外圧などの各種荷重が作用する場合の座屈問題を解明することは構造物の強度設計上最重要事項であり、これまでに多くの研究がなされてきた。

例えば、薄肉シェル構造物の座屈強度評価上、最も基本的な円筒シェルの軸圧縮力による座屈強度は種々の境界条件の下で八巻らにより明らかになっている。また、円筒シェルの座屈は、断面の形状変化を伴う座屈であるが、その現れ方には、厚肉、薄肉、内圧荷重、長さなどの要因により、非常に多くの様式がある。

本研究では、デジタル画像相関法を用いて軸圧縮力を受ける円筒シェルの載荷実験を行い、前例が少ない円筒シェルの座屈挙動の全視野計測を実施する。さらに、円筒シェルの弾性および弾塑性座屈挙動を、座屈前後の変位・ひずみの変化に注目して、古典理論の座屈強度と実験値との比較、検討することを目的としたものである。

2. デジタル画像相関法の基本原理

デジタル画像相関法¹⁾とは、CCDカメラのようなデジタルカメラで解析対象物表面の変形前後の2枚の画像をデジタル的に取り込み、変形前後を比較することで画像全体に渡って変形分布を求めることのできる計測方法である。また、2台のカメラを用いて計測することにより、3次元の変位量、変位方向および形状を求めることができる。さらに、ひずみは移動画素量からひずみゲージ法を用いて算出する。

3. 円筒シェルの座屈計測

3.1 計測概要

円筒シェルの座屈挙動を非接触全視野で計測するために、デジタル画像相関法を用いて計測を行った。図-1に計測風景を示す。

試験片材料には、アルミニウム合金(JIS : 6061)の厚肉円筒シェル(試験片 A)と既成アルミニウム缶の薄肉円筒シェル(試験片 B)を用いた。試験片 A, B は弾性係数 $E=70\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ である。それぞれの円筒シェルの座標系と諸元を図-2と表-1に示す。座標系は点 O を中心とし、 u, v, w は x, y, z 座標に関する座屈時増分変位とし、計測範囲は ABCD の半円筒の領域とする。縁端境界条件は、試験片 A は単純支持、試験片 B は完全固定として、上端に軸方向圧縮を加えた。



図-1 計測風景

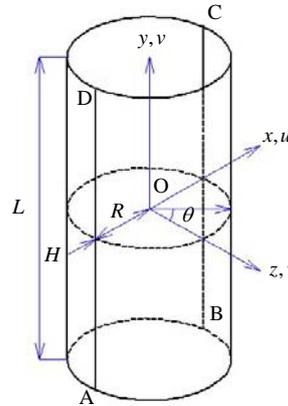


図-2 円筒シェルの座標系と諸元

R : 円筒半径(板厚中心まで)
 L : 円筒の長さ
 H : 板厚
 R/H : 径厚比
 R/L : 径長比
 Z : 形状係数

$$Z = \sqrt{1 - \nu^2} \frac{L^2}{RH}$$

表-1 試験片寸法

試験片	R(mm)	L(mm)	H(mm)	R/H	R/L	Z
A	22	135	1	22	0.163	790
B	33	99	0.15	220	0.333	2833

3.2 厚肉円筒シェルの座屈計測結果

試験片 A を用いて軸圧縮座屈実験を行った結果を図-3に示す。図-3(a)は圧縮荷重 P と軸方向圧縮量 δ との関係を示したもので、図-3(b)は1次座屈後 a 点での座屈の際の増分変位 dR を等高線表示したものである。また、 $\theta = -20^\circ, 0^\circ, 20^\circ$ における軸方向の増分変位波形、最大主ひずみ、最小主ひずみ波形を図-4に示す。

図-3の a 点において厚肉円筒シェル特有の座屈形態である象の脚型座屈を生じ、徐々に δ が増大して座屈後の安定な釣合い状態に移行していることがわかる。また、図-3(b)において変位等高線が斜めに分布しているのは、縁端部の初期不整により完全な軸圧縮が行えず、偏心によるねじれが発生したためと考えられる。図-4において、象の脚型座屈を生じている部分では最大主ひずみ、最小主ひずみの集中を確認できる。よって、象の脚型座屈を全視野で計測できていることがわかる。

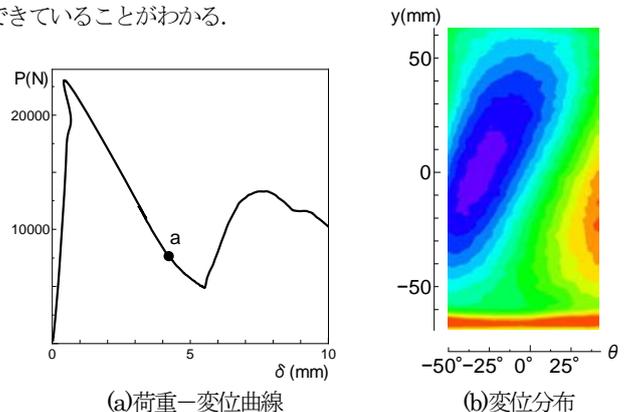


図-3 荷重-変位曲線と a 点での変位分布図

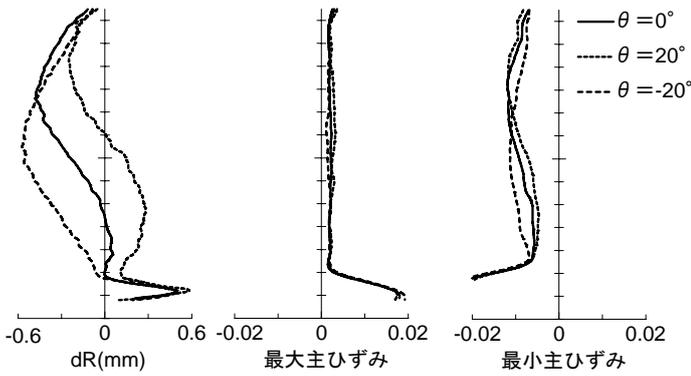


図-4 軸方向たわみ波形と最大, 最小主ひずみ波形

3.3 薄肉円筒シェルの座屈計測結果

試験片 B を用いて軸圧縮座屈実験を行った結果を図-5 に示す。図-5 に示すように、座屈分岐点では薄肉円筒シェル特有の座屈形態であるダイヤモンド座屈(図-6)を起こし、急激に荷重が減少して座屈後の安定な釣合い状態に飛び移ることがわかる。また、図-7(a), (b)に一次座屈前後の軸方向における変位分布図、 $\theta = -20^\circ, 0^\circ, 20^\circ$ の位置での軸方向たわみ波形、図-8(a), (b)に $Y=11\text{mm}, 4\text{mm}, -4\text{mm}$ の位置での周方向たわみ波形の結果を示す。図-7 に示す軸方向たわみ波形より、1 次座屈前後の挙動がまったく異なっていることがわかる。しかし、図-8 の周方向たわみ波形では 1 次座屈前後でのたわみの挙動に明らかに相関が見られる。よって、周方向たわみ波形が 1 次座屈を引き起こす要因になっていることが考えられる。

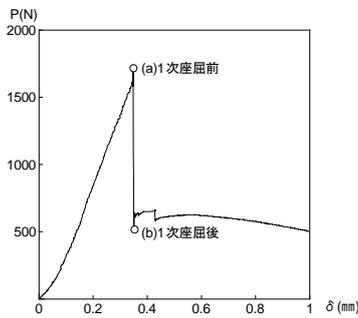


図-5 荷重-変位曲線

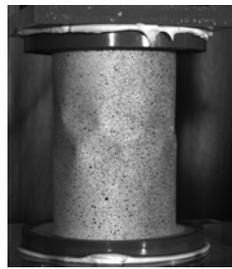
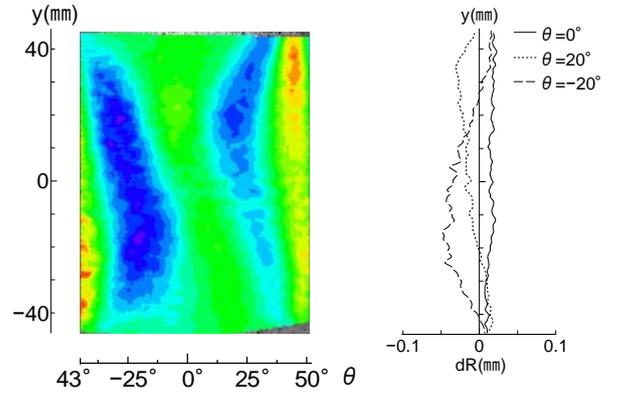


図-6 ダイヤモンド座屈

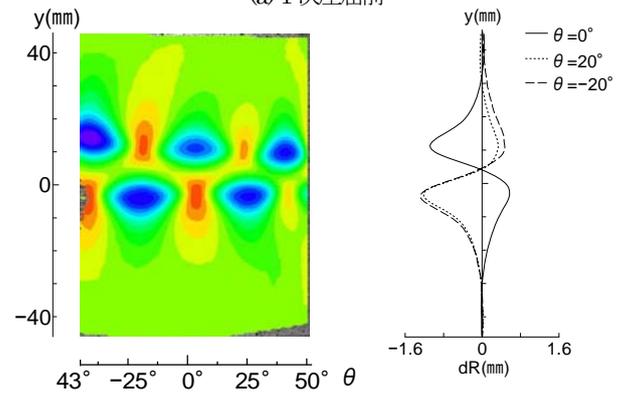
ここで、古典弾性座屈荷重 $P_{cl}^{(2)}$ は式(1)で表される。

$$P_{cl} = \frac{2\pi E H^2}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} = 5989 [N]$$

実験で計測された座屈荷重 P は、1630N であり、古典理論値に対して約 1/4 となる。八巻らによって明らかにされている理論では、古典理論値よりも座屈荷重が 8~15%の間で減少するものであり、大きな誤差が生じた。この原因として考えられるのが、試験片 B の径厚比 R/H は 220 であり、塑性領域から弾性領域に変化する遷移領域に入っていると考えられ、弾性座屈問題ではないと考えられる。また、縁端部境界条件が完全固定と再現されず、誤差が生じたと考えられる。今後は、板厚に比べて円筒半径の大きい円筒を用いて、弾性座屈問題に近づく実験を行う必要があり、また完全固定を再現するために固定方法の改良をする必要がある。

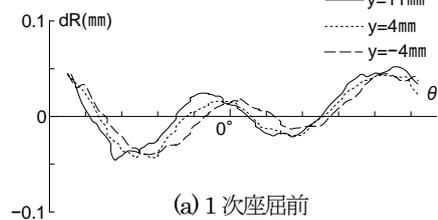


(a) 1 次座屈前

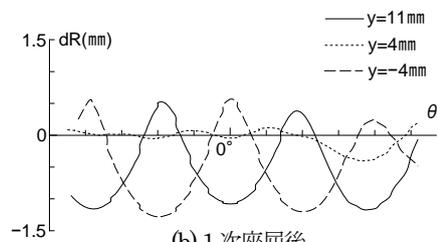


(b) 1 次座屈後

図-7 一次座屈前後の軸方向の変位分布およびたわみ波形



(a) 1 次座屈前



(b) 1 次座屈後

図-8 一次座屈前後の周方向のたわみ波形

4. まとめ

デジタル画像相関法により、従来の計測方法では不可能であった円筒シェルの 3 次元変形計測が可能である。また、円筒シェルの座屈波形を全視野で計測することができ、座屈挙動を捉えることができた。薄肉円筒シェル特有の座屈形態を計測することができ、座屈前後を比較することによって周方向の変位が先行し、ダイヤモンド座屈を起こしている要因となっていることがわかった。

参考文献:

- (1) デジタル画像相関法, 実験力学, Journal of JSEM Vol.3 No.2, pp59-62, 日本実験力学会, 2003.
- (2) 社団法人日本機会学会編: シェルの振動と座屈ハンドブック, 技法堂出版, 2002