

円筒シェルの座屈挙動に関する実験及び解析的研究

長崎大学大学院 学生会員 ○戸次 翔 長崎大学 正会員 松田 浩  
 長崎大学 非会員 古賀 掲維 同済大学 非会員 趙 程

1. 序論

円筒シェルの座屈問題に関しては、多くの実験結果に基づく座屈強度曲線が提案されている。円筒シェルの研究では、形状などの初期不整の影響が座屈特性に大きく影響することが明らかにされているが、実験や計測が困難であり、RS(Reduce Stiffness)法<sup>1)</sup>や確率論的手法等による解析方法が提案されている。しかし、座屈挙動を正確に再現するまでには至っていない。

本研究では、円筒シェルの座屈挙動に対する形状初期不整の影響を実験・解析的に検討する。まず、デジタル画像相関法<sup>2)</sup>(以下、DICM)を用いて試験体の形状初期不整を、マイクロメータを用いて厚さ不整の計測を行った。これらの計測データを基に初期不整を考慮した解析モデルを作製し、汎用コード Marc を用いて非線形座屈解析を実施した。さらに実験結果と解析結果との比較を行い、形状初期不整及び厚さ不整が座屈挙動へ及ぼす影響を定量的に明らかにし、構造物の実際の耐荷重を解析的に推測することを目的としている。

2. 形状初期不整計測

形状初期不整計測には DICM を用いた。DICM は 2 台のカメラを用いたステレオ撮影による 3 次元形状・変位計測法である。計測対象とした薄肉・厚肉円筒シェル試験体(No.1: 薄肉, No.2: 厚肉)の形状パラメータを表-1 に示す。

座屈実験を行うため、各試験体の上下端に、厚さ 5mm のアクリル板を取り付け固定した。計測は試験体を回転台に設置し回転角 30°毎に計 12 回(360°)行い、計測データを結合した。また、各試験体の厚さ不整は、マイクロメータを用いて、図-1 の A, B のラインの位置でそれぞれ等間隔に 8 箇所計測を行った。厚さ不整の計測結果を表-2 に、各試験体の形状初期不整計測結果を図-1 に示す。表-2 より、試験体は圧延されて製作されているため、片側が薄いという特徴が見られた。図-1(a), (b)より、どちらも中心辺りで色が大きく変わっていることから、形状不整が大きくなっていることが確認された。

3. 座屈実験

本実験では試験体の上端から軸方向に 0.04mm/min の載荷速度で荷重を与えた。座屈荷重は No.1 試験体で 1.23kN, No.2 試験体で 7.02kN となった。また、座屈形状を計測するために、座屈が発生した直後に荷重を一

表-1 各円筒シェルの形状パラメータ

試験体	高さ:L (mm)	平均厚さ:H (mm)	半径:R (mm)	径厚比 R/H
No.1	66	0.157	33	210
No.2		0.395	25	63

表-2 厚さ不整計測結果

試験体	計測点	1	2	3	4	5	6	7	8	全体平均(mm)
		No.1	A	0.20	0.20	0.18	0.15	0.14	0.13	
B	0.20	0.20	0.18	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13		
平均	0.20	0.20	0.18	0.15	0.14	0.13	0.13	0.13		
No.2	A	0.47	0.47	0.47	0.38	0.34	0.34	0.34	0.34	0.395
B	0.48	0.47	0.47	0.39	0.34	0.34	0.34	0.34		
平均	0.48	0.47	0.47	0.39	0.34	0.34	0.34	0.34		

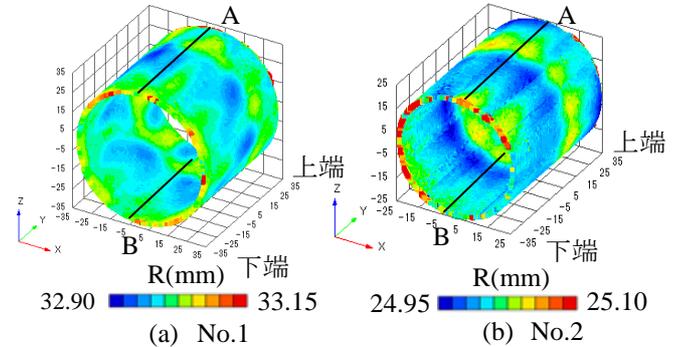


図-1 形状初期不整計測結果

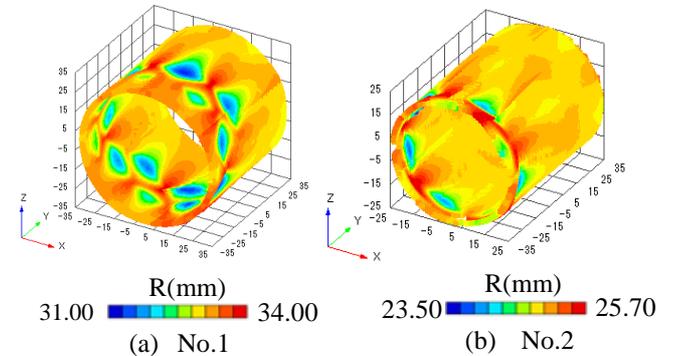


図-2 座屈形状計測結果

定とし、再度形状計測を行った。各試験体の座屈形状計測結果を図-2 に示す。各試験体でダイヤモンド型座屈を確認することができた。No.1 試験体では、中心よりやや下方に座屈形状が見られた。No.2 試験体では、下端部に座屈形状が見られた。これは、試験体の厚さ不整の影響により、厚さの薄い部分に座屈が発生したと考えられる。

4. 非線形座屈解析

解析モデルについては、DICM で計測した形状データを基に、形状初期不整を考慮したモデルと、形状初期

キーワード：デジタル画像相関法、円筒シェル、座屈挙動

住所：長崎県長崎市文教町 1-14 長崎大学大学院工学研究科総合工学専攻構造工学コース

電話、FAX：095-819-2590

不整を考慮しないモデルを作製した。厚さについては、表-2 に示す 2 種類の計測値(平均厚さ, 実厚さ)を使用した。メッシュ分割については, No.1 試験体では円周方向 200 分割, 高さ方向 60 分割, No.2 試験体では円周方向 150 分割, 高さ方向 60 分割としており, 各解析モデルとも一辺が約 1mm の四節点四角形要素を用いている。材料定数は静弾性係数  $E=54,833\text{MPa}$ , ポアソン比  $\nu=0.34$ , 降伏応力  $\sigma_y=230\text{MPa}$  である。

5. 解析結果

各解析モデルにおける解析結果を表-3, 4 に示す。薄肉円筒シェル試験体については, 表-3 の①, ②から形状初期不整の影響により約 37%座屈荷重が低下した。また, ③, ④から厚さ不整の影響により約 27%座屈荷重が低下した。さらに, ⑤から両不整の影響により 53.8%座屈荷重が低下した。以上より, 薄肉円筒シェルは形状初期不整と厚さ不整の両方に対して極めて敏感性が高く, 座屈荷重低下の大きな要因であることが確認された。

厚肉円筒シェル試験体については, 表-4 の⑥, ⑦から形状初期不整の有無による大きな座屈荷重の低下は見られなかった。⑧, ⑨からは厚さ不整の影響により約 15%座屈荷重が低下した。また, ⑩から両不整の影響により約 15%座屈荷重が低下している。以上より, 厚肉円筒シェルは形状初期不整に対する敏感性は低いが, 厚さ不整に対する敏感性は高く, 厚さ不整が座屈荷重を低下させる大きな要因であることが確認された。

各試験体の形状初期不整計測結果, 座屈形状計測結果および解析で得られた座屈形状の平面図を図-3 に示す。解析結果には, 形状初期不整と厚さ不整の両不整を考慮したものを示している。

No.1 試験体については, 中心よりやや下側にダイヤモンド型座屈をシミュレートすることができた。図-3 に示す座屈形状計測結果の 90°と 270°付近部で座屈形状が乱れている。これは, 同位置における初期不整値が大きかったためではないかと考える。

No.2 試験体については, 下端部に発生するダイヤモンド型座屈を精度よくシミュレートすることができた。図-3 より, 厚肉円筒シェル試験体において微小な形状初期不整が見られるが, 不均一な座屈形状は見られなかった。よって, 厚肉円筒シェルでは形状初期不整が座屈形状に与える影響は小さいと考える。

6. 結論

- ・ 形状初期不整は, 薄肉円筒シェルでは座屈荷重に大きな影響を与えることが確認されたが, 厚肉円筒シェルでは確認されなかった。
- ・ 厚さ不整は, 薄肉円筒シェル, 厚肉円筒シェル共に大きな影響を与えることが確認された。
- ・ 初期不整の計測結果を解析モデルに適用することにより, 座屈形状をシミュレートすることができた。

表-3 No.1 試験体解析結果

種類	厚さパターン	形状初期不整	座屈荷重(kN)	低下率(%)
①	平均厚さ	有	3.21	38.9
		無	5.25	
②	実厚さ	有	2.43	35.0
		無	3.73	
③	平均厚さ	有	3.21	28.9
	実厚さ		2.43	
④	平均厚さ	無	5.25	24.4
	実厚さ		3.73	
⑤	平均厚さ	有	2.43	53.8
	実厚さ	無	5.25	

表-4 No.2 試験体解析結果

種類	厚さパターン	形状初期不整	座屈荷重(kN)	低下率(%)
⑥	平均厚さ	有	13.64	0.11
		無	13.66	
⑦	実厚さ	有	11.64	0.03
		無	11.64	
⑧	平均厚さ	有	13.64	14.8
	実厚さ		11.64	
⑨	平均厚さ	無	13.66	14.7
	実厚さ		11.64	
⑩	平均厚さ	有	11.64	14.8
	実厚さ	無	13.66	

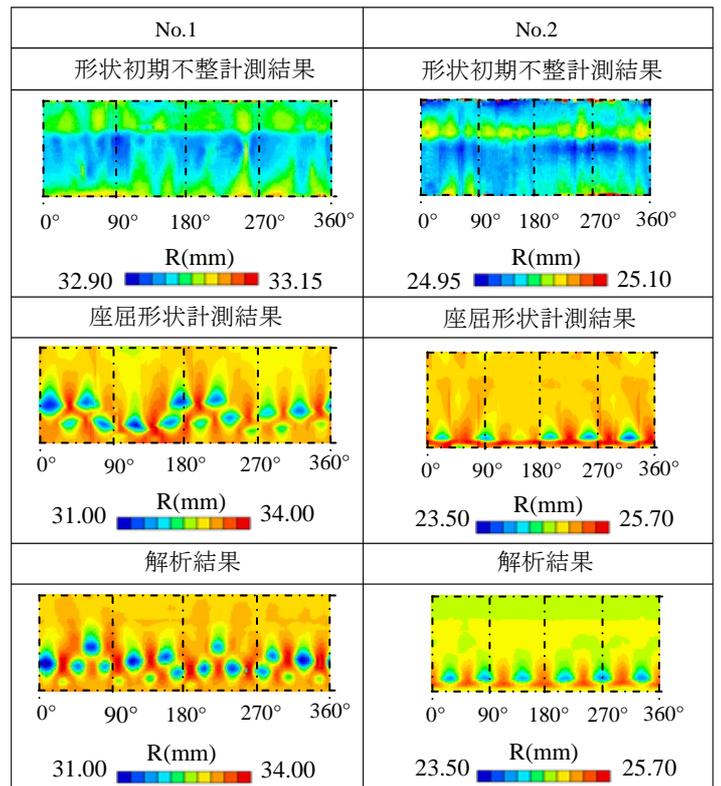


図-3 計測・解析結果比較

参考文献

- 1) 山田聖志, 軸圧円筒殻の座屈問題への RS 法適用に関する非線形解析的検討, 日本機械学会論文集(A編), 64(619), pp.765-772, 1998
- 2) 出水享, 他 6 名, Fundamental Study on Improvement in Strain Measurement Accuracy of Digital Image Correlation Method, 土木学会論文集 A2(応用力学), 68(2), pp.683-690, 2012