薄肉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　○小宮允人　　長崎大学　正会員　森田千尋，松田浩，出水　亨
長崎大学　非会員　古賀掲維　同済大学　非会員　趙　程

1. 序論

円筒シェル構造は軽量で高剛性であるため多くの分野で構造要素として多用されているが、形状初期不整の影響から座屈強度が低下し座屈破壊が生じやすい構造である。

本研究では，初期不整敏感度が高く分岐座屈点が不明確な，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。

2. 形状初期不整と厚さ不整計測

形状初期不整および厚さ不整を考慮した解析モデルを作成するために，No.1 試験体と No.2 試験体の形状初期不整と厚さ不整計測を行った。この計測から得られた形状パラメータを表 1 に，形状初期不整計測結果を図 1 に，厚さ不整計測結果を表 2 に示す。理論では，径厚比 R/H=50 以下が厚肉円筒シェル，R/H=400 以上が薄肉円筒シェルとなっている。そのため No.1 試験体は薄肉円筒シェルに近く，No.2 試験体は厚肉円筒シェルに近い形状である。

3. 座屈実験

本実験では両端完全固定とした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 1,518N，No.2 試験体が 7,018N となった。また座屈後形状を計測するために，座屈が発生した直後に載荷を停止し，形状初期不整計測と同方法で座屈形状を計測した。各試験体の座屈形状計測結果を図 2 に示す。No.1 試験体ではダイヤモンドバックリング，No.2 試験体ではエレファントバックリングに近い座屈形状を確認することができた。

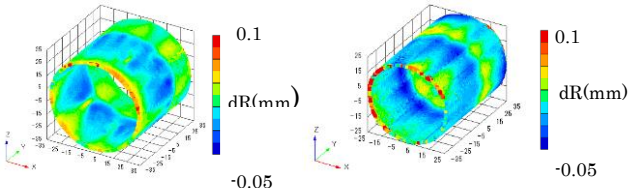
4. 非線形座屈解析

解析に適用する材料の弾性係数と応力－ひずみ関係を計測するため，座屈試験で使用した素材から試験体を切り出し，引張試験を実施した。この材料試験の結果を表 4 に示す。ポアソン比は，試験体に曲率があり計測が難しいため，No.1 試験体は 0.35，No.2 試験体は 0.33 を使用した。

また試験体の残留応力を調べるため，応力解放試験を行ったが，結果は 0.2%耐力よりも非常に小さく，大きな影響を与えるほどではないと判断した。よって，今後の解析では残留応力は考慮せず解析を行うこととした。応力解放試験の結果を表 5 に示す。

表 1　形状パラメータ

試験体	半径 R (mm)	高さ L (mm)	最小厚さ H_{min} (mm)	最大厚さ H_{max} (mm)	平均厚さ H_{ave} (mm)	径厚比 R/H_{ave}	形状関数 Z
No.1	33	66	0.13	0.2	0.157	254	808.2
No.2	25	66	0.34	0.475	0.395	74	416.4

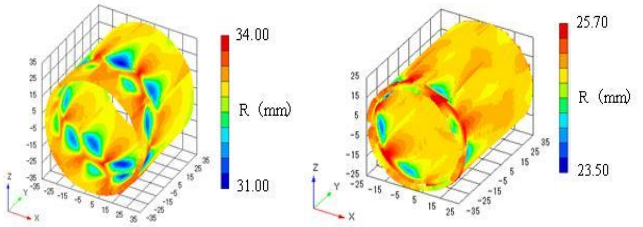


No.1　　No.2

図 1　形状初期不整結果

表 2　厚さ不整計測結果

試験体	計測点	1	2	3	4	5	6	7	8
No.1	A	0.2	0.2	0.18	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13
	B	0.2	0.2	0.18	0.15	0.14	0.13	0.13	0.13
	(A+B)/2	0.2	0.2	0.18	0.145	0.14	0.13	0.13	0.13
No.2	A	0.48	0.47	0.47	0.38	0.34	0.34	0.34	0.34
	B	0.48	0.47	0.47	0.38	0.34	0.34	0.34	0.34
	(A+B)/2	0.48	0.47	0.47	0.38	0.34	0.34	0.34	0.34



No.1　　No.2

図 2　座屈形状計測結果

表 4　引張試験結果

試験体	弾性係数(MPa)	0.2%耐力(MPa)
No.1	64,944	229
No.2	66,700	132

表 5　応力解放試験結果

試験体	ひずみゲージ	切断前(μ)	切断後(μ)	残留ひずみ(μ)
No.1	円周方向	2,688	2,602	86
	高さ方向	-151	-116	-35
	斜め方向	2,708	2,465	63
No.2	円周方向	594	618	24
	高さ方向	2,059	2,141	82
	斜め方向	2,760	2,780	19

これまでの計測，試験結果からのデータを基に形状作成プログラムを用いて有限要素モデルを作成した。まず試験体の高さ，半径，円周・高さ方向の分割数，厚さ不整データの形状パラメータを読み込ませる。そして形状初期不整データを読み込み，面外方向の形状初期不整データの平均値節点の座標値として与えている。解析モデルは，No1 モデルでは円周方向 200 分割，高さ方向 60 分割，No.2 モデルでは円周方向 150 分割，高さ方向 60 分割で作成しており，各解析モデルともに約 1.0mm×約 1.0mm のメッシュ分割である。そして材料試験から得られた応力－ひずみの関係を利用した弾塑性解析を行った。

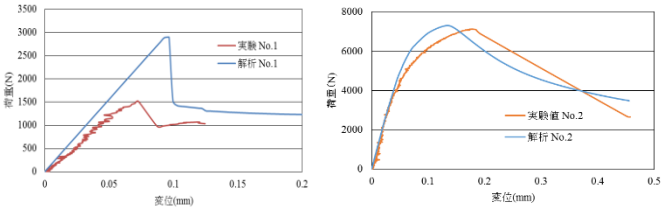
節点の初期不整値は、計測から得られた点群データより求める。その方法として，いつくかあるが，ここでは計測した点群データの平均値を与えている。また、FEM メッシュ作成には，すべての点群データを三角形要素を用いて曲面を作成するといった方法などもあるが，初期不整値の与え方やメッシュ作成法の違いについては，現在検討中である。

5. 非線形座屈解析結果

実験と解析の荷重－変位曲線を図 3 に，初期不整計測結果と座屈形状計測結果との比較を図 4 に示す。

No.1 において実験では最大荷重は 1,518N, 解析では 2,900N と約 2 倍となった。図 4 より No.1 は実験，解析の両方で弾性座屈が生じ，座屈形状は図 5 より中心よりやや下部で全円周方向に 2 段のダイヤモンドバックリングを確認できた。座屈形状は高精度にシミュレートできたが，座屈荷重が異なる結果となっている。この要因は，形状初期不整への敏感性が非常に高いためであり，形状初期不整と厚さ不整のより詳細なデータを解析モデルに適用する必要があると考える。また，形状初期不整の違いによって，座屈にどのような影響を与えるかを調査する必要がある。モンテカルロシミュレーションといった確率論的解析を行い，膨大な解析データを検討することで，形状初期不整による座屈挙動への影響を調査していくことを，今後の課題としている。

No.2 において実験では最大荷重が 7,018N, 解析では 7,390N と比較的近い値となった。座屈形状では実験と解析の両方で最も厚さの小さい最下部で座屈形状を確認でき，どちらもエレファントバックリングに近い形状を確認できた。荷重変位曲線については，非常に高精度のシミュレートができていたが，塑性域に入る荷重に差が見られた。荷重変位曲線については，非常に高精度のシミュレートができていたが，塑性域に入る荷重に差が見られた。



No.1　　No.2

図 3　荷重変位曲線

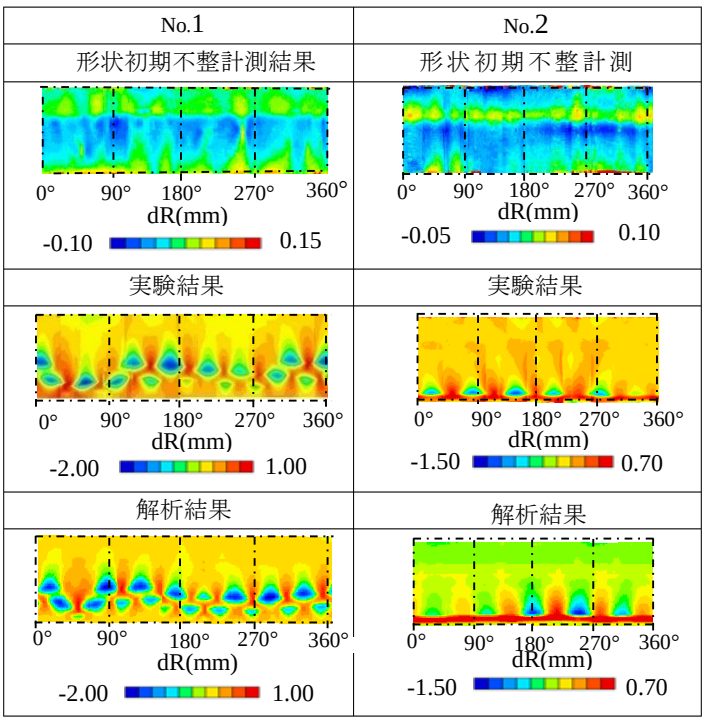


図 4　実験と解析の計測結果

6. 結論

1) No.1 試験体は，高精度のシミュレートができた。
2) 解析モデルの作成時における節点 r の座標値の計算を他の方法でも行い，比較・検討を行う必要がある。
3) 現在，解析モデルのメッシュ分割は正方形に近い形をとって作成しているが、メッシュ分割の形の変化による影響を検討する必要がある。
4) 薄肉試験体は，より詳細な形状初期不整と厚さ不整を解析モデルへ適用し，シミュレートする必要がある。
5) 確率論的解析をすることで，形状初期不整と厚さ不整が座屈に及ぼす影響を調査する必要がある。

参考文献

1) 土木学会，座屈設計ガイドライン改訂第 2 版[2005 年版]
2) 日本機械学会，シェルの振動と座屈ハンドブック
3) Richard Degenhardt, Investigations on imperfection sensitivity and deduction of improved knock-down factors for unstiffened CFRP cylindrical shells