

# 実形状初期不整データを用いた薄肉円筒シェルの座屈解析

長崎大学 正会員 松田浩 黄美 学生会員 ○上妻隼人 趙程 非会員 浦田直矢

## 1. 序 論

円筒シェルの座屈の特徴は、一般に後座屈強度の低下及び種々の初期不整に対する敏感性にある。これは薄肉シェルの場合に特に顕著であり、設計に際しては座屈問題の検討が不可欠である。また、軸圧縮を受ける薄肉円筒シェルの座屈荷重の理論的な算定方法は、古くから多くの研究者 (例えば [1]) によって取り扱われてきたが、その結果のほとんどが実験座屈荷重を大きく上回っている。一方、形状初期不整が座屈挙動へ及ぼす影響に関する解析的理論的研究 [2,3] も数多く実施されているが、実際の初期不整を計測し、解析モデルに取り込むといったアプローチは少ない。

本研究は、薄肉シェル構造の不安定座屈問題をテーマとし、特に不安定性が顕著である軸圧縮力が作用する薄肉円筒シェルの座屈挙動への実形状初期不整の影響を実験及び解析的に検討すること、また、三次元形状計測装置を使用した薄肉シェル構造の形状初期不整計測→モデリング→非線形挙動解析までの一連の解析手法の適用性や有用性を検討することを目的とする。

## 2. 初期不整計測

形状初期不整の計測対象物にはアルミニウム合金製の薄肉円筒シェル試験体を使用し、同材料の引張試験によって得られた主な材料定数は、縦弾性係数  $E=70,000\text{MPa}$ 、降伏応力  $\sigma_y=270\text{MPa}$  であった。各形状パラメータを表 1 に示す。尚、ポアソン比  $\nu$  は一般的な 0.3 と仮定した。

表 1：薄肉円筒シェル試験体の形状パラメータ

試験体	板厚 $t$ (mm)	半径 $R$ (mm)	高さ $L$ (mm)	径厚比 $R/t$	形状係数 $Z$
NO.1	0.134	33	66	246	940

※薄肉円筒シェル形状係数  $Z=(1-\nu^2)^{0.5}L^2/Rt$

### 2.1 光学的三次元形状計測装置

本計測では非接触式の光学的三次元計測装置 (デジタル画像相関法) を使用して薄肉円筒シェル試験体の初期不整計測を実施した。本計測装置の構成を図 1 に示す。白黒 130 万画素の CCD カメラ 2 台を使用してステレオ撮影により画像を取得し、三次元形状データを算出する。本計測装置で得られる形状データは計測物表面の三次元点群データである。

### 2.2 形状初期不整計測とモデリング

形状初期不整を考慮した有限要素モデルの作成手順は、まずターンテーブルに試験体を設置し、回転角度  $30^\circ$  毎に試験体の形状初期不整データを計測し、計 12 のデータを結合させ有限要素モデルに変換した (図 2 参照)。形状初期不整計測結果を図 3 に示すが、総点群データ数は 38,000 であった。点群データには自動メッシュ作成ソフトウェアでサーフェイスを生成した。有限要素モデルの総要素数は約 11,000、要素サイズは  $1.0\text{mm}\times 1.0\text{mm}$  程度とした。

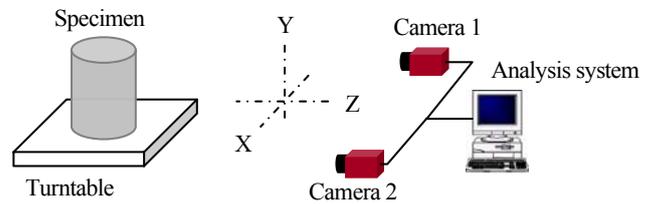


図 1：デジタル画像相関法の構成

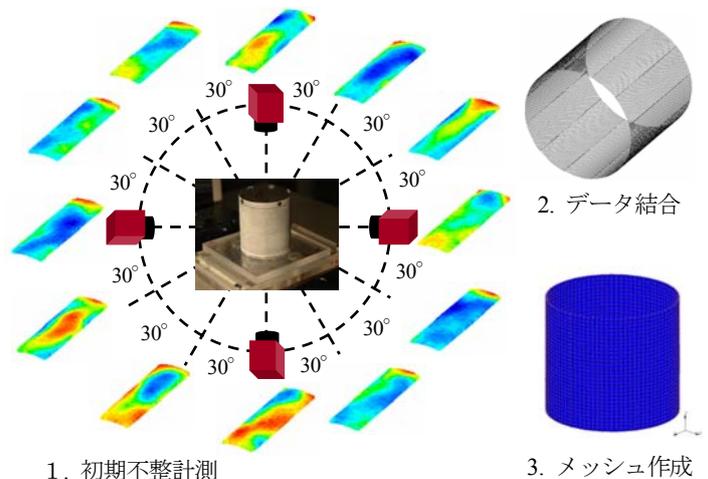


図 2：モデリングの流れ

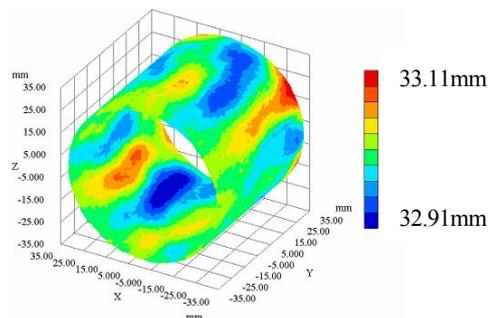


図 3：形状初期不整計測結果 (半径方向変位  $R$ )

### 3. 座屈解析

初期形状不整を考慮した有限要素モデルを汎用有限要素解析ソフト MSC.Marc/Mentat2005r3 を使用して非線形挙動解析を実施した。完全弾塑性モデルとし、弧長法を使用して座屈分岐点に至るまでモデルに軸圧縮変位を与えた。また、比較のために初期不整のない完全円筒モデルでも同解析を実施し、座屈挙動と座屈荷重を算出した。

### 4. 座屈実験

形状初期不整計測した試験体において軸圧縮載荷試験を実施し、デジタル画像相関法によって座屈挙動を計測した。境界条件は、アクリル製固定ジグに溝を設け、端部を挿入し、高強度石膏を流し込むことで完全固定を再現した。載荷速度は 0.05mm/sec とし、座屈に至るまで載荷した。載荷直前に初期不整を計測し、そのデータから有限要素モデルを作成した。座屈が発生した直後に、載荷を一度停止し、再び円筒シェル全表面を三次元形状計測し、座屈形状データを作成した。

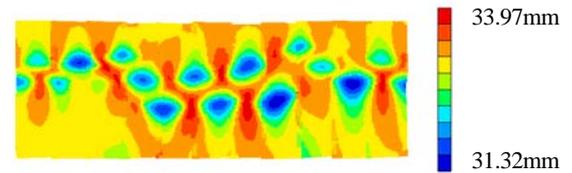
### 5. 結果

表 2 に座屈荷重結果を、図 4-A, B, C に座屈モード結果を、図 4-D に解析結果のみの荷重変位線図と初期不整モデルの座屈前後の変位を示す。図 3 の形状初期不整結果は、本試験体の規格半径 33mm に対して最大で約 ±0.1mm 程度の微小な面外変位であった。形状初期不整分布は円周方向に約 6 波程度、軸方向に約半波となる初期不整分布であった。

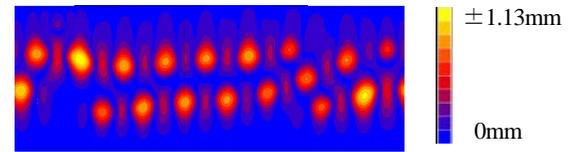
実形状初期不整を考慮した有限要素モデルによる非線形挙動解析の結果は、完全円筒モデルの解析座屈荷重値を 100% とすると初期不整モデルで約 72.1%、実験では 69.7% となった。この結果より、微小な形状初期不整が薄肉円筒シェルの座屈荷重を大幅に低下させる要因であることが実験及び解析的に証明された。さらに初期不整モデルと実験の座屈荷重の誤差は約 3.2% と小さいことから、形状初期不整を解析モデルに考慮することで実挙動を良好にシミュレートできることが確認できた。また、座屈モードを比較すると、図 4-A の実験に対して、図 4-B の初期不整モデルは円周方向座屈波数がやや異なるものの、軸方向座屈波数は一致する傾向となり、ダイヤモンド型座屈の分布傾向も類似している。しかし、図 4-C の完全円筒モデルは円周方向、軸方向ともに座屈波数が大きく異なった。

表 2 : 座屈荷重結果

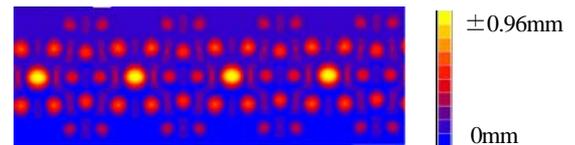
実験 (N)	初期不整モデル (N)	完全円筒モデル (N)
3172	3278	4549



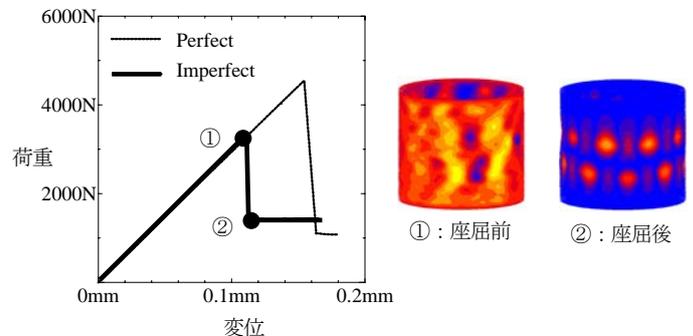
A : 実験座屈モード (半径方向変位  $R$ )



B : 初期不整モデル座屈モード (半径方向増分変位  $dR$ )



C : 完全円筒モデル座屈モード (半径方向増分変位  $dR$ )



D : 荷重変位線図と初期不整モデルの座屈前後の変位モード

図 4 : 座屈モードと荷重変位線図結果

### 6. 結論

本研究では、形状初期不整が薄肉円筒シェル構造物の不安定座屈に及ぼす影響について実験及び解析的に検討した。

1. 解析結果より、本プロセスは薄肉シェル構造の形状初期不整を高精度に計測でき、有限要素モデルへの転用も可能であること、有用性が高いことを示すことができた。
2. 薄肉円筒シェル特有の不安定座屈挙動をこれまでの研究例にない新しいアプローチで調査し、実験結果に非常に良く類似する解析結果を得ることができた。

### 7. 参考文献

- [1] Timoshenko SP, Gere JM. Theory of elastic stability. 2<sup>nd</sup> ed. New York: McGraw-Hill 1961.
- [2] N. Yamaki. Elastic Stability of Circular Cylindrical Shells, North-Holland 1984.
- [3] Yamada S. Nonlinear Analytical Confirmation on the Application of Reduced Stiffness Method of the Buckling of Axially compressed Cylinders. Japan. JSME 1998.