

初期不整を有する薄肉円筒シェルの終局強度の統計的評価法

長崎大学大学院 学生員 ○鬼塚友章・小宮允人 正会員 古賀掲維・松田浩

1. 序論

筆者らは、これまでに形状初期不整を有する薄肉円筒シェルの終局挙動特性を解明するため、デジタル画像相関法 (DICM) により得られた薄肉円筒シェル試験体の三次元点群データを基に、形状初期不整を考慮した有限要素モデルを作成し、非線形有限要素解析を実施してきた。形状初期不整を考慮することにより、座屈モードや座屈荷重などの薄肉円筒シェル特有の終局挙動をある程度シミュレートすることができた。しかしながら、形状初期不整の大きさが終局挙動に及ぼす影響について感度解析を行ってみたところ、薄肉円筒シェルの終局挙動はわずかな形状初期不整の変化に対して極めて敏感であることが確認できた。

一方、薄肉円筒シェルの形状初期不整はそれぞれの試験体で異なっている。対象とする薄肉円筒シェルの形状初期不整を計測し、形状初期不整を考慮した解析モデルを用いて非線形弾塑性解析を行えば、薄肉円筒シェルの終局挙動をシミュレートすることはできるが、様々な径厚比を有する膨大な数の薄肉円筒シェルについて同様の解析を行うのは膨大な時間がかかり現実的ではない。径厚比などの様々なパラメータを有する薄肉円筒シェルに対して、形状初期不整を有する薄肉円筒シェルの終局挙動をより総合的に評価するためには、統計的な手法が有効であると考えられる。

以上に鑑み、薄肉円筒シェルの終局挙動に大きな影響を及ぼす形状初期不整に着目し、薄肉円筒シェルの形状初期不整の計測、座屈実験および非線形有限要素解析を実施するとともに、形状初期不整の分布モデルを構築し、形状初期不整を有する薄肉円筒シェルの終局挙動を統計的に評価する手法について検討した。

2. 試験体及び载荷試験概要

本実験で使用した半径 $R=33\text{mm}$ 、厚さ $H=0.158\text{mm}$ 、高さ $L=66\text{mm}$ 径厚比 $R/H=208$ の薄肉円筒シェル試験体概要を図 1 に示す。試験体表面に白黒ランダムパターンを施し、DICM による初期不整計測を行った。

载荷試験は 10kN 万能試験機を用いて行った。载荷は試験体の上端から軸方向に 0.04mm/min の载荷速度で行った。

3. 形状初期不整計測

デジタル画像相関法 (DICM) を用いて計測するにあたり、試験体に白と黒のスプレーでランダムパターンを施した。試験体を 30° 毎に回転させ、計 12 回分の計測データを結合させた。計測した試験体の数は 3 体である。図 2 は計測した形状初期不整データを可視化

したグラフの例である。図 2 より試験体の全面にわたって形状初期不整が分布しているのがわかる。

4. 形状初期不整を考慮した弾塑性解析

4.1 解析モデル概要

有限要素モデルに形状初期不整を与える際に、1 試験体当たり約 70 万個ある形状初期不整のデータについて、節点を中心とする範囲について平均を算出し、節点の形状初期不整値として与えた。要素分割数は、軸方向に 60 分割、円周方向に 200 分割とした。

ヤング率は 91.1GPa 、ポアソン比は 0.33 である。

4.2 解析結果

解析より得られた荷重—変位曲線を図 3 に示す。また実験結果と解析結果の座屈形状を可視化したものを図 4 に示す。

図 3 より解析結果と実験結果の座屈荷重がほぼ一致していることがわかる。また図 4 より解析結果でもダイヤモンドバックリングを再現できていることが確認できた。

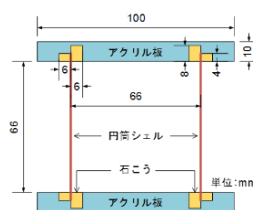


図 1 試験体概要図

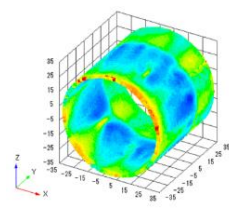


図 2 形状初期不整の可視化結果

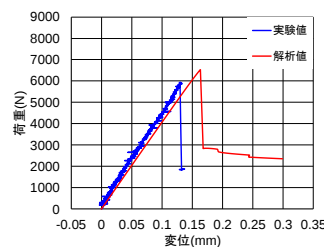


図 3 荷重—変位曲線

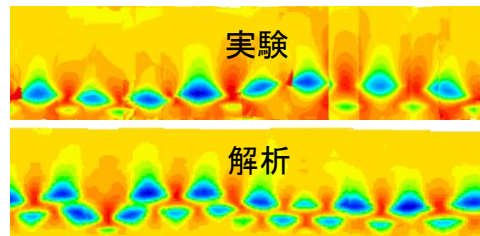


図 4 座屈形状

キーワード：統計的評価法、薄肉円筒シェル、初期不整、終局挙動

住所：〒852-8521

長崎市文教町 1-14 長崎大学大学院工学研究科松田研究室

電話、FAX：095-819-2590

5. 統計的評価手法

5.1 試験体の形状初期不整分布

統計的評価を行うために、DICM より得られた各試験体の形状初期不整の度数分布を求めた。各試験体における形状初期不整分布のばらつきの影響を抑えるため、各試験体の形状初期不整データを合計したものを形状初期不整分布として採用することとした。図 5 は各試験体の形状初期不整データを合計した約 215 万個のデータの度数分布である。

5.2 形状初期不整分布モデル

図 5 の度数分布図に対し正規性の検定を行った。正規確率プロットを図 6 に示す。図 6 から、計測で得られたデータは、ほぼ直線であるため、得られた形状初期不整の分布は正規分布に従っていると判断した。したがって、本研究では、正規分布を用いて初期不整分布モデルを作成した。図 7 は、形状初期不整データから求めた平均 ($0.833 \times 10^{-3} \text{mm}$) および標準偏差 ($0.332 \times 10^{-1} \text{mm}$) を用いた作成した正規分布曲線である。

5.3 評価手法概要

形状初期不整分布モデルに従う乱数を発生させ、解析モデルを作成した。乱数は発生させる度に異なる値となるため、作成した解析モデルは、常に異なった形状初期不整分布を持つモデルとなる。この異なる形状初期不整分布を持つモデルを繰り返し非線形有限要素解析することによって、形状初期不整を有する薄肉円筒シェルの終局挙動を評価する。

5.4 座屈荷重応答値

図 8 は径厚比 R/H が 200 の場合について、形状初期不整がない解析モデルと乱数により形状初期不整を与えた解析モデルの終局挙動を比較したグラフである。図 8 より形状初期不整を有するモデルは形状初期不整がないモデルと比較して座屈荷重が大幅に低下していることがわかる。

図 9 は同じく径厚比 200 の場合について、形状初期不整を与えたモデルの座屈荷重を不整がないモデルの座屈荷重で正規化した座屈荷重応答値である。図 9 より形状初期不整を有するモデルの座屈荷重応答値は、それぞれ一定の範囲に集中していることがわかる。

図 10 は径厚比 200 の場合について、座屈荷重応答値の度数分布と確率密度関数を求めたものである。解析したモデル数は約 150 体である。座屈荷重応答値も形状初期不整データの度数分布同様に検定を行った。度数分布の正規確率プロットを図 11 に示す。図 11 から度数分布のプロットは、ほぼ直線と言えるので、正規分布であると言える。

このことから、正規分布に従う形状初期不整分布を有する薄肉円筒シェルの座屈荷重応答値は一定範囲に収まるものと考えられる。すなわち、ある程度の解析モデルについて解析を行えば、同様な形状初期不整分布をもつ薄肉円筒シェルの終局挙動を統計的に評価することが可能となるものと考ええる。

図 12 は異なる径厚比 $R/H=50, 100, 200, 400$ のモデルについて座屈荷重応答値を求め、グラフにプロットしたものである。径厚比毎に座屈荷重応答値の分布状況に違いはあるが、概ねある程度の範囲内に収まっていることが確認できる。図 12 の座屈荷重応答値の最小値および最大値を結んだ曲線は、形状初期不整を有する薄肉円筒シェルの終局強度曲線と考える。

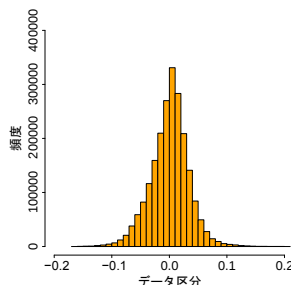


図 5 合計した形状初期不整分布

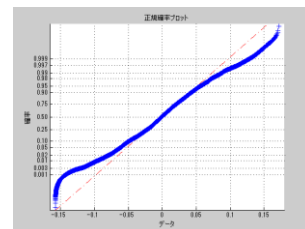


図 6 正規確率プロット

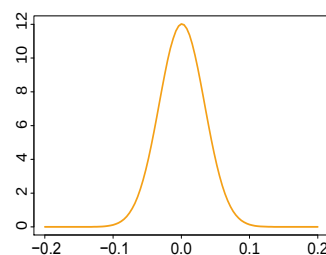


図 7 正規分布曲線

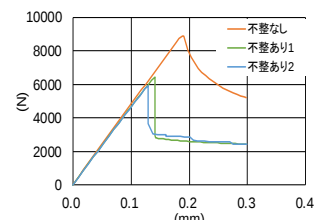


図 8 終局挙動の比較

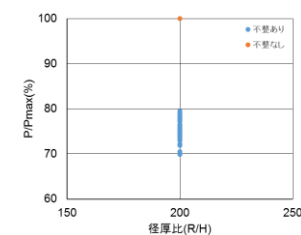


図 9 座屈荷重の応答値

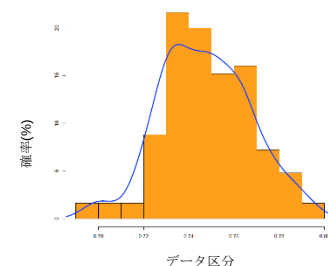


図 10 座屈荷重応答値の度数分布

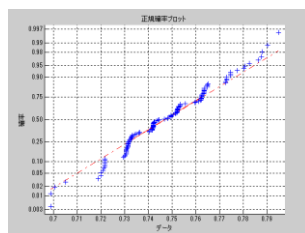


図 11 正規確率プロット

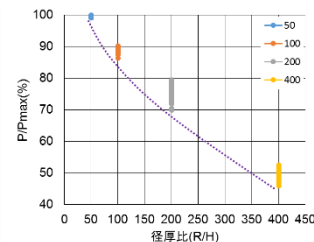


図 12 径厚比毎の座屈荷重応答値

6. 結論

解析結果から、薄肉円筒シェルにおける終局挙動を統計的に評価することが可能となった。さらに、異なる径厚比についての解析を行うことによって形状初期不整を有する薄肉円筒シェルの終局強度曲線を得ることができることを示した。

参考文献

- 1) R. Degengardt, A. Bethge, et al., Probabilistic Approach for Better Buckling Knock-Down Factors of CFRP Cylindrical Shells - Tests and Analyses, 18th Engineering Mechanics Division Conference (EMD2007)
- 2) 土木学会, 座屈設計ガイドライン改訂第 2 版[2005 年版]