

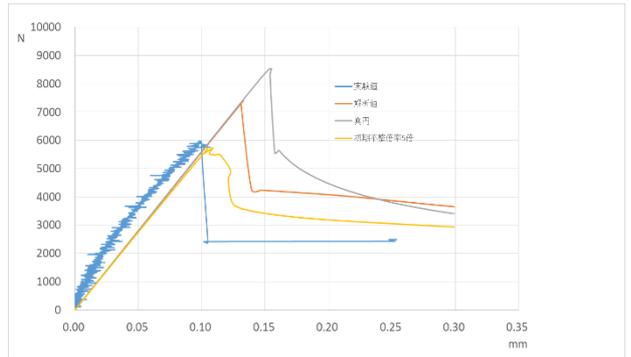
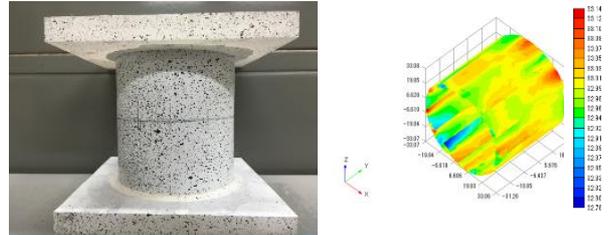
初期不整を有する薄肉円筒シェルの終局挙動の実験・解析・統計的評価法

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・森田千尋・松田浩

1. 序論

これまで本研究室では、デジタル画像相関法（以下 DICM）を用いて円筒シェル試験体の初期不整を計測し、荷重試験を実施するとともに、得られた三次元点群データから初期不整を考慮した解析モデル作成し、非線形解析を行い、実験と解析結果の比較を行ってきた。座屈波形はある程度シミュレートできたが、座屈荷重においては高精度にシミュレートすることが出来ないという課題が残されていた。感度解析の結果から、薄肉円筒シェルの座屈挙動は、わずかな形状初期不整の変化に対し極めて敏感であることが明らかとなった。

本研究では、薄肉円筒シェルの座屈荷重値に大きく影響を与える形状初期不整に焦点を当て、再度詳細な実験を行うとともに、モンテカルロシミュレーション¹⁾により初期不整を統計的に考慮した有限要素解析による終局強度の評価法について検討することを目的としている。



2. DICM を用いた解析

2.1 実験および解析概要

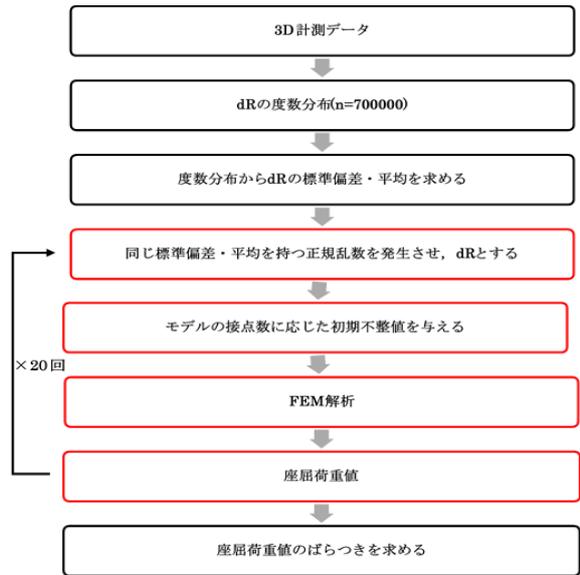
本実験で使用した半径 $R=33\text{mm}$ 、厚さ $H=0.158\text{mm}$ 、高さ $L=66\text{mm}$ 径厚比 $R/H=208$ の薄肉円筒シェル試験体を写真1に示す。試験体表面に白黒ランダムパターンを施し、DICMによる初期不整計測を行った。

荷重試験は10kN 万能試験機を用いて行った。荷重は試験体の上端から軸方向に 0.04mm/min の荷重速度で行った。

また DICM の計測結果から得られたデータを基に、形状作成プログラムを用いて形状初期不整を考慮した有限要素モデルを作成した。円筒シェルの 3D モデルを図1に示す。

2.2 実験及び解析結果

実験と解析より得られた荷重-変位曲線を図2に示す。実験値に対して解析値のほうが約22%高い値となった。初期不整倍率を5倍の間で変化させると、座屈モードは一定で、座屈荷重については図2に示すように実験値とほぼ一致する結果となった。試験体作成誤差を考慮すると、実験値と解析値の座屈荷重値の差は妥当であると判断した。



3. 統計的評価法

3.1 確率論的手法

図2に示したように、同じ径厚比の円筒シェルにおいて、解析による座屈荷重値は全く不整のない完全な円筒シェルモデルと比較した場合の半径の差 dR (mm) によって大きく左右される。座屈荷重値の分布と dR との関係を経験的に評価することができれば、薄肉円筒シェルの座屈挙動を確率論的に定量評価することが可能となることが考えられる。そこで、モンテカルロシミュレーションに基づき、乱数を用いた確率分布による統計的評価を行った。

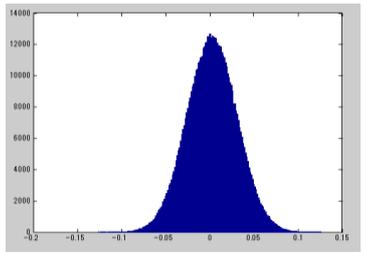
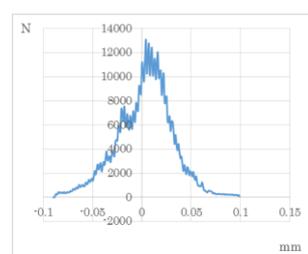


図4 計測データ度数分布

図5 計測データに基づいた正規乱数

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：長崎県長崎市文教町 1-14 長崎大学大学院工学部光化学研究科総合工学専攻構工学コース
 電話，FAX：095-819-2590

3.2 解析モデル概要

作成した析モデルは、高さ 66mm、板厚 0.158mm とし、半径 33mm の真円に内接、外接する正多角形の中心から頂点までの距離の平均を半径に取った正多角形モデルである。分割数は Z 方向に 60 分割、 θ 方向に 200 分割としている。

3.3 解析概要

モンテカルロシミュレーションを用いた解析概要を図 3 に示す。まず、DICM による約 700000 個の計測データから dR の度数分布図 (図 4) を作成し、図 4 の標準偏差と平均から特定の dR が解析モデルに対して存在する割合を求めた。この割合に基づき、正規乱数を解析モデルの各節点に形状初期不整として与えることで、実際に計測した試験体を模した乱数モデルを作成することができた。モデルに与えた dR の正規乱数を図 5 に示す。

次に、モデルに対して非線形座屈解析を行い、座屈荷重値を求めた。この作業を今回は 20 回繰り返す、座屈荷重値のばらつきについて検討した。

さらに、実構造物では全体の形状計測が困難な場合もあり得るので、部分的な計測による統計的評価の可能性についても検討するために、全体計測および部分的計測のデータから得られた初期不整の分布を基に、解析モデルを作成し、非線形座屈解析を行い、座屈荷重を比較した。なお、解析に影響を与える計測誤差を取り除くため、試験体の形状初期不整分布図から外れ値を決定し、上下限 1% を除いた。

3.4 解析結果

計測データに基づいた正規乱数を形状初期不整として与えたモデルの座屈荷重値の比較を解析値、外れ値を考慮したモデルの解析結果と合わせて図 6 に示す。外れ値については、図 6 から、今回の計測では影響を与えていないと判断できる。図 7 は $R/H=208$ の円筒シェルに正規乱数を 20 回与えた場合の終局強度の応答値である。縦軸は完全な円筒シェルの終局強度の値で正規化している。図 8 はその結果の度数分布を示したものである。わずかに 20 個の正規乱数データによる座屈強度の応答値のばらつきも正規化していることが示唆される。回数を重ねるとさらに制度の良い確率密度が得られると考える。座屈荷重値は 70%~90% の間でばらついてはいるものの、80%前後に集中している。また、これらのデータから確率密度関数が求められる。

最後に、試験体の強軸直角方向を正面とした原点から θ 方向に 30° のみ計測した初期不整の度数分布を図 9 に、この情報を基に作製したモデルの初期不整の正規乱数、荷重-変位曲線を図 10、図 11 に示す。図 11 から、局所的な計測であっても全体を計測したモデルの座屈荷重値との間に大きな差がないことがわかる。

4. 結論

解析結果から、薄肉円筒シェルにおけるモンテカルロシミュレーションを用いた終局挙動を統計的に評価することが可能となり、全体の計測が困難である実構造物に対しても適用可能であることが判断できる。

5. 今後の予定

ここでは、 $R/H=208$ の場合に対してモンテカルロシミュレーションを実施したが、他の径厚比における場合も考慮し、応答曲面法などの実験計画法を用いることにより薄肉円筒シェルの座屈強度を確率論的に評価できるものと考えている。

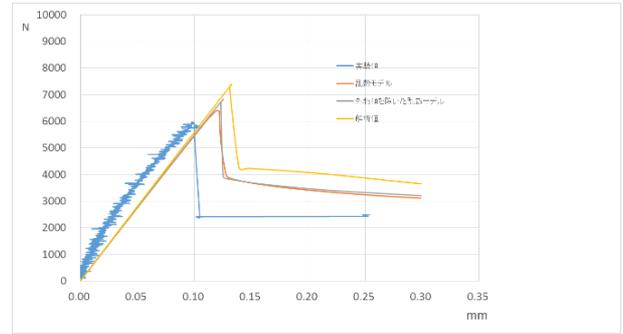


図 6 dR の分布による座屈荷重のばらつき

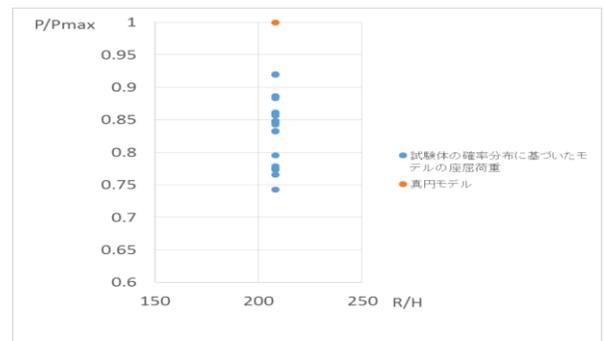


図 7 座屈荷重プロット図

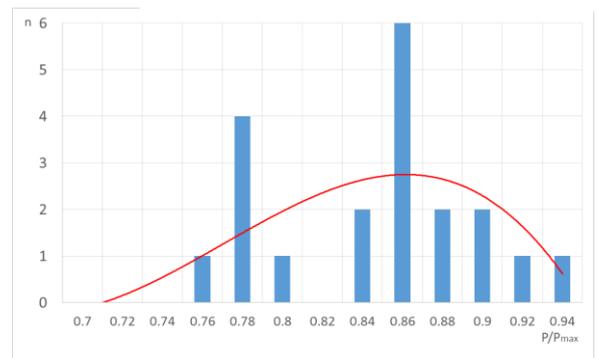


図 8 確率密度

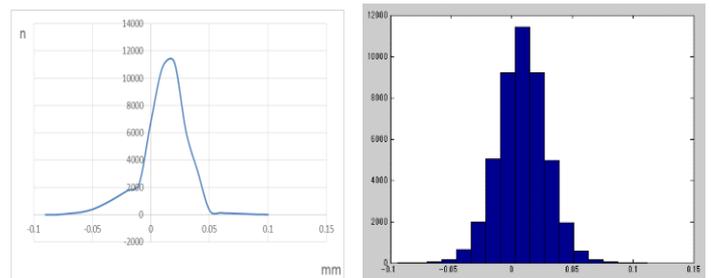


図 9 30° 度数分布

図 10 30° 度数分布

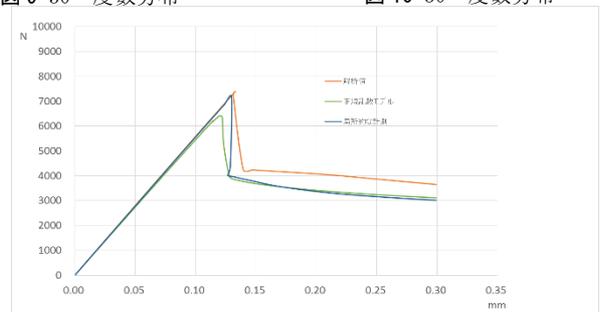


図 11 荷重-変位曲線比較

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]