

外圧を受けるリング補強円筒殻の高精度な座屈強度推定式の開発

九州大学大学院工学府 海洋システム工学専攻 博士後期課程 2 年（助成時）
博士後期課程 3 年（現 在）

塩満 大祐

1. 緒言

リング補強円筒殻とは、胴板と呼ばれる円筒状の殻に補強リングを周方向に取り付けた構造物であり、その形状特性のために高圧環境に耐え得る構造となっている。そのため、潜水船をはじめ、パイプラインや海洋構造物の主要構造部材として用いられている。リング補強円筒殻の設計を行う場合には、外圧が作用する際の座屈強度を精度良く推定することが重要となる。リング補強円筒殻の弾性域における主な座屈形態として、全体座屈、胴板座屈、補強リングの横倒れ座屈の 3 つが挙げられる。これらの座屈形態における座屈強度は、計算機を用いて有限要素法（FEM）を適用することで正確に計算可能ではあるものの、FEM 計算ではモデル作成から計算まで多大な労力と時間を要するため、初期設計段階では、座屈強度を簡便に評価できる解析的手法を用いた理論的推定式が必要とされる。しかしながら、現在一般的に用いられている推定式は、精度が低く、また強度推定することができない特定の横倒れ座屈モードが存在する。したがって、上記 3 つの座屈モードに対する高精度な強度推定式を提案することを目的とする。

2. 推定式の開発

開発する推定式の精度を検証するための正解値を得るために、初めに FEM 計算を行った。推定式の適用限界を調査し、精度を高レベルで担保するために各部材の寸法範囲を広げたモデルに対する計算を行った。FEM 計算から得られた座屈モードの例を図 1 に示す。

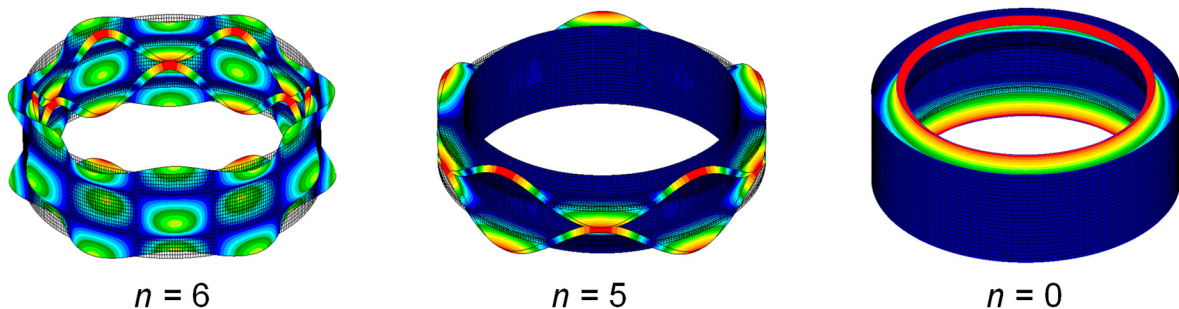


図 1 胴板座屈と横倒れ座屈モードの例: n は周方向座屈波数.

図 1 の $n = 0$ が、従来式では推定不可能な横倒れ座屈モードである。さて、リング補強円筒殻の 3 つの座屈モードそれぞれに対する推定式を開発する予定であったが、FEM 計算結果を分析したところ、胴板座屈と横倒れ座屈は密接に関係して発生することが判明し、推定

式の精度向上を考えた場合に、この連成影響を無視することはできないと考えられたため、まず初めに、胴板座屈と横倒れ座屈強度の両方をまとめて推定することができる式の開発から着手した。本研究では、胴板座屈と横倒れ座屈の変形の相互影響を考慮した変位関数を仮定し、エネルギー法を用いることで2つの座屈強度をまとめて推定できる式を導出した。また、従来式では式の簡略化のために無視されてきた2つの影響（円筒形状に沿った定式化の影響、ウェブに作用する半径方向および周方向応力の影響）を考慮することで、精度向上および従来式では推定不可能な座屈モードの強度を推定できる可能性を探った。

3. 精度検証

開発した推定式の精度を検証するために、FEM 計算結果との比較を行った。図 2, 3 に比較結果を示す。図 2 は、基本寸法における FEM 計算結果、従来式（赤、緑）、提案式（青）の比較を示し ((a), (b)は補強リングの配置方法が異なる)、横軸は周方向座屈波数、縦軸は座屈強度を表す。図 3 は、提案式から得られる推定値と FEM の相関を示し、横軸は推定値、縦軸は FEM 計算結果を表す。

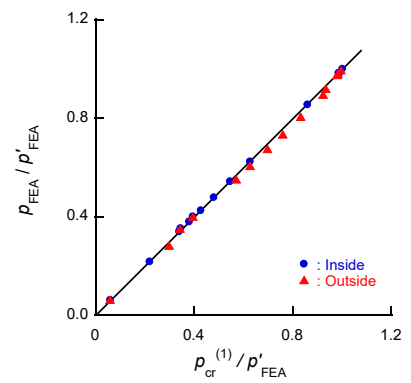
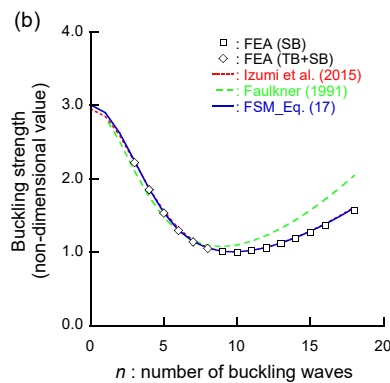
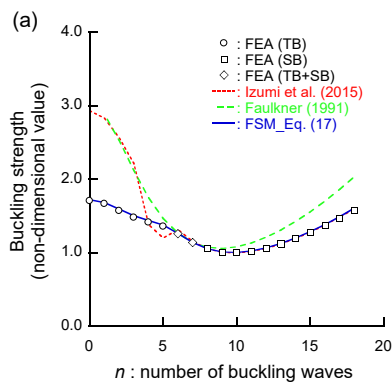


図 2 FEM 計算結果，従来式（赤，緑），提案式（青）の比較。

図 3 推定値と FEM の相関。

図 2(a)より、従来式は横倒れ座屈強度 TB を大きく推定している一方、提案式は胴板座屈と横倒れ座屈の変形の相互影響を考慮しているため、FEM 計算の傾向を精度良くとらえることができている。また、上述したように $n=0$ という横倒れ座屈モードが生じるが、従来式ではこれの推定が不可能である。これに対して、提案式では、従来式に考慮されていない影響（円筒形状を考慮した定式化とウェブに作用する応力）を考慮しているため、このモードを推定することができる。

図 3 は、図中の黒い実線にプロットが近ければ近いほど精度が高いことを表すが、提案式は、全ケースで FEM 計算結果を非常に高精度で推定可能であることが分かる。

4. 結言

提案式は、胴板座屈と横倒れ座屈強度を精度良く推定することができることが分かった。ただし、提案式は非常に複雑であるため、初期設計で取り扱いやすくするために簡略化する必要がある。以上、本成果は、国際ジャーナル *Thin-Walled Structures* に掲載された¹⁾。

1) D. Shiomitsu, D. Yanagihara: Elastic local shell and stiffener-tripping buckling strength of ring-stiffened cylindrical shells under external pressure, *Thin-Walled Structures*, Vol. 148, 106622, 2020.