

補剛円筒シェルの局部座屈解析

愛媛大学工学部 正員 大賀水田生
徳山高専 正員 重松 恒美
徳山高専 正員 原 隆
愛媛大学工学部 正員 杉山 忠司

1. まえがき

軸圧縮力を受ける補剛円筒シェルの座屈形式は補剛材間隔が狭い場合と広い場合とでは異なり、間隔が狭い場合は全体座屈形式により崩壊し、間隔が広い場合は補剛材間シェルパネルあるいは補剛材の局部座屈により崩壊することが知られている。全体座屈形式の崩壊については、これまで数多くの研究が行われ、異方性シェル理論が適用できることが報告されている。一方、局部座屈に関する研究は、補剛材とシェルパネルを分離し、それぞれの部材の耐荷力を単独に評価した研究がほとんどである。しかし、このような解析法では、補剛材とシェルパネルの連成挙動が座屈強度に及ぼす影響を考慮することができない。そこで、本研究では、両者の連成挙動を正確に反映した解析法を提案し、補剛円筒シェルの局部座屈強度を検討する。さらに、本法を弾塑性問題に拡張し、補剛材取り付けなどにより生じる残留応力が座屈強度に及ぼす影響をも検討する。

2. 解析方法

図-1に本研究で取り扱った軸方向圧縮力を受ける補剛円筒シェルを示している。このような補剛円筒シェルの場合、座屈モードの対称性より解析対象は図-2のb区間となる。解析方法として、著者が前回¹⁾補剛オープンシェルの座屈解析に展開した伝達マトリックス法を適用した。シェルパネルと補剛材を一体として取り扱うため、シェルパネル部の格間伝達マトリックス、補剛材の格間伝達マトリックスおよび座標変換マトリックスを導入した。この場合、シェルパネル部の格間伝達マトリックスは、従来、変位を円周方向に級数展開して誘導されているが、本研究では、非載荷辺の対称および逆対称条件を考慮できるように、変位を円筒の長さ方向に級数展開して誘導した。

1) 格間伝達マトリックス シェルパネル部の格間伝達マトリックスの誘導の概要を次に示す。まず、シェル要素の断面力のつり合い条件と変形条件より得られる状態量間の関係式を長さ方向に級数展開することにより、状態量ベクトル Z_s に関する一階の連立常微分方程式が得られる。

$$\frac{d}{d\varphi} Z_s = A Z_s \quad (1)$$

ここに、 $Z_s = \{\bar{w}, \bar{\varphi}_\varphi, \bar{M}_\varphi, \bar{Q}_\varphi, \bar{v}, \bar{u}, \bar{N}_\varphi, \bar{N}_{xx}\}^T$ 、 A : 係数マトリックス式(1)を積分することにより円筒シェルに関する格間伝達マトリックス F_s が次のように得られる。

$$Z_s = e^{A\varphi} Z_{s0} = F_s Z_{s0} \quad (2)$$

補剛材の格間伝達マトリックス F_R も板要素の断面力のつり合い条件を考慮することにより同様な手順で誘導されるが、シェルパネル部との連続条件を満足するため、面外変位成分のみならず面内変位成分をも考慮している。

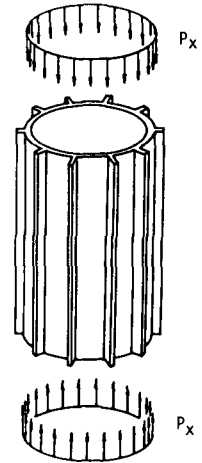


図-1 軸圧縮力を受ける補剛円筒シェル

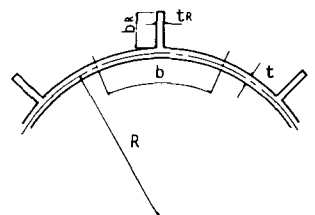


図-2 断面諸量

2) 弾塑性座屈解析 本研究では、弾性部分に対しては前述の弾性域の格間伝達マトリックスを、塑性部分に対しては塑性域の格間伝達マトリックスを導入して弾塑性座屈解析を行った。塑性域に対する格間伝達マトリックスは、弾性域での応力-ひずみ関係式

$$\sigma = D_e \cdot \epsilon \quad (3)$$

$$\sigma = \{\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}\}^T, \quad \epsilon = \{\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}\}^T$$

の応力-ひずみマトリックス D_e を塑性域の応力-ひずみマトリックス D_p に変換することにより誘導した。その際、材料は Hencky の変形理論に従うものとし、降伏の判定には von Mises の降伏条件を採用した。

3. 数値計算結果および考察

図-3, 4 に 8 本および 24 本の補剛材を有する場合の本研究の解析法による結果と従来の解析法による結果の比較を示している。横軸には補剛材幅比 b_r/b 、縦軸には座屈荷重パラメータ k ($= b^2 P_k / \pi^2 K$, K : シェルパネルの曲げ剛性) を取っている (図-2 参照)。また、長さ-半径比 $L/R = 10$ 、半径-肉厚比 $R/t = 100$ である。図-3 の曲線 A-B-C が本解析法により得られた結果であり、曲線 A-D-E および A-F-G は従来の解析法による結果である。曲線 A-B および A-D はシェルパネルの座屈を示し、曲線 B-C, D-E および F-G は補剛材の局部座屈を示している。曲線 A-D はシェルパネルが補剛材取り付け点で単純支持されていると仮定した場合の結果であり、曲線 D-E および F-G はそれぞれ補剛材がシェルパネルに固定および単純支持されていると仮定した場合の結果である。図-3, 4 より、従来の解析法では補剛材のねじり剛性を考慮していなかったため、シェルパネルの座屈強度が過小評価されていること、また補剛材の支持状態を固定あるいは単純のいずれかに仮定しているため、補剛材の座屈強度が正確に評価されていないことが明らかになった。

図-5 に弾塑性座屈解析により得られた結果を示している。本例では降伏応力の 25% および 30% の圧縮残留応力を図-5 に示すような応力分布で仮定している。図より、シェルパネルの板厚の大きい範囲以外では、座屈強度がほぼ圧縮残留応力に相当する強度だけ低下することが明らかになった。

4. 結果

本報で提案した解析法を用いることにより、シェルパネルと補剛材の連成挙動を正確に反映した解析が可能である。また、弾塑性座屈解析結果より、残留応力が存在する場合には、ほぼ圧縮残留応力だけ座屈強度が低下することが明らかになった。

参考文献 1) 重松他: 補剛材を有するオープンシェルの座屈解析について、第35回土木学会中国四支部年次学術講演要集, 1983. 5.
2) 大賀他: 補剛材を有するオープンシェルの座屈解析, 愛媛大学工学部紀要, 第10巻, 第3号, 1984. 2.

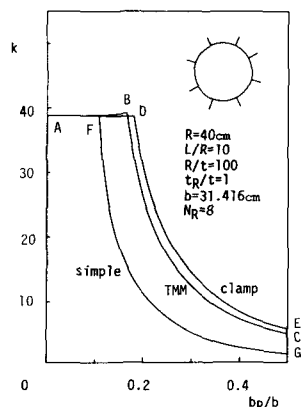


図-3 座屈強度曲線

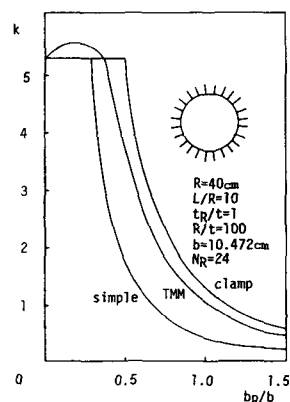


図-4 座屈強度曲線

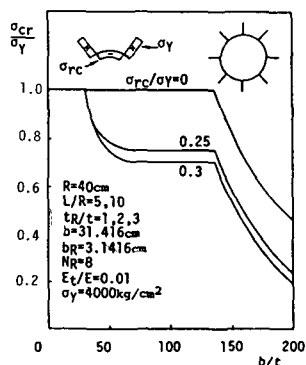


図-5 座屈強度曲線