

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 秋田 剛

修士（工学）秋田 剛 提出の論文は「射影行列による膜面構造のリンクリング解析に関する研究」と題し、6章と2項目の補遺とから成っている。

近年、ソーラーセイルやリフレクターなど様々な大型宇宙構造物の構成要素として、軽量かつ高収納性という特性を持つ膜材が大きな注目を集めている。膜材を利用した膜面構造では、内圧やケーブル等を用いて膜面に張力を導入し、構造物としての形態を維持するが、構造上の制約や外力の影響などから、全ての領域を張力状態とすることは困難であり、通常は圧縮力が作用する領域を含むことになる。それらの領域では、圧縮力により膜面は容易に局所座屈を起こすことになり、いわゆるリンクル（しわ）やスラック（たるみ）を生じる。リンクルは、一つの主応力方向に張力が作用した状態で他の主応力方向に作用する圧縮力により座屈が起きて、それにより膜面にはしわ波が発生する。スラックは両主応力方向からの圧縮力による座屈状態で、膜面はほぼ無応力状態となる。曲げ剛性が零であるような膜材を想定して、それらの座屈状態を面内の収縮変形に置き換えてモデル化した理論が張力場理論で、張力場理論によるリンクルやスラックを含む膜面の解析を本論文ではリンクリング解析と呼んでいる。近年の膜面構造のリンクリング解析は、剛性変化法と変形勾配テンソル修正法とに大別される。剛性変化法は、膜材の応力状態を引張主応力方向を弾性主方向としたある種の特殊な直交異方性体の応力状態と同等として導いた修正弾性マトリクスを用いる方法であり、変形勾配テンソル修正法は、リンクルのキネマティクスに基づいてリンクル発生領域において変形勾配テンソルを修正する方法である。前者は有限要素解析に組み込むことが容易であるものの物理的な背景が明確でなく、また後者は物理的な解釈が明瞭であるもののそれによる有限要素解析への定式化は非常に複雑である。

本論文では、線形代数上の視点から射影の概念を用いてリンクル現象を扱っており、物理的な解釈が明瞭な修正弾性マトリクスを導いて、それにより安定した膜面構造の有限要素解析が可能になったことを示している。本論文は、有限要素法を用いた膜面構造の解析や設計に新たな発展をもたらすものであると同時に、本論文の射影の概念によって表現される歪み・応力関係は、膜面のリンクリング解析以外にも、特殊な弾性問題、例えば、岩盤解析などの様に、圧縮力のみを伝達する要素を仮定するさまざまな問題にも適用可能であり、今後の幅広い活用が期待できる。

第1章は序論であり、膜面構造物の解析について、今までの研究を紹介し、問題点の整理を行い、本論文の目的を述べている。

第2章では、一軸引張応力場が形成されるリンクル状態の膜面の変形を、通常の平

面応力問題に従った引張変形と、リンクルの発生に伴う収縮変形との重ね合わせによって表し、線形代数における擬ノルム最小化の概念に基づいて射影行列により、修正弾性マトリクスが容易に導かれることを示している。特に後者の収縮変形の前後では歪みエネルギーが変化しないことを用いている。また、解析の途中に主応力方向が変化することに起因する非線形性を考慮した増分型の修正弾性マトリクスを導いて、その成分を陽に示している。

第3章では、埋め込み座標系を用いた **Total Lagrange** 法により有限要素法の定式化を行い、構成則テンソルの埋め込み座標系成分を修正弾性マトリクスから計算する方法を示している。また、リンクリング解析の際に問題となる接線剛性行列の特異性について述べ、その回避方法を提示している。

第4章では、具体的な例題を通して、提示した修正弾性マトリクスによるリンクリング解析法の有効性を示している。従来の解析法による解析が収束に大きなステップ数を要したり、収束解を得ることができないような場合でも、本解析法が安定した収束性を示すことや、厳密なシェルモデルによる解析から得られた主応力値と、本解析法により得られた主応力値とが十分な一致を示すことを述べている。

第5章では、リンクルの発生に伴う収縮変形の強度を表すリンクル歪みエネルギーを定義し、半解析微分法により射影行列を利用したリンクル歪みエネルギーの簡潔な感度評価式を求めている。膜面の周辺にケーブルを配置した構造を例題として取り上げ、ケーブル自然長に対する感度解析を行って、この感度評価式がリンクル領域の減少などの最適化問題に有効であることを示している。

第6章は、結論であり、本研究の成果を要約している。

また、補遺において、近年導かれた構成則テンソルを修正する新たな方法をも含め、従来の張力場理論と本論文の解析法との関係を明確に解説している。

以上要するに、本論文は、新たに線形代数的な視点から射影の概念を用いてリンクル現象を捉えており、そのような視点から求められる正確な修正弾性マトリクスを用いたリンクリング解析法を提示し、またリンクル歪みエネルギーの感度評価式を導いてリンクルを含む膜面構造物の最適化問題に明確な指針を与えたもので、航空宇宙工学、構造工学、建築学、および計算力学上貢献するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。