

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 岩佐 貴史

修士（工学）岩佐 貴史 提出の論文は「リンクルを有する膜面の定量的評価に関する研究」と題し、8章からなっている。

膜はソーラーセイルや太陽発電衛星などの次世代大型宇宙構造物や、地上の建築構造物でもスタジアムや体育館といった最近の大空間構造物を構成する重要な構造要素である。膜は曲げ剛性が非常に小さく、曲げや圧縮に対する抵抗力がほとんどない。圧縮応力が作用すると膜面にはリンクル（しわ）が発生する。それは座屈現象の一種であり、その挙動を正確に把握するには微小な曲げ剛性を考慮した幾何学的非線形解析を行う必要がある。しかしリンクル現象は非線形性が非常に強い現象なので、通常非線形解析では座屈後解析が進行するに従い工学的に意味のある最終的な解を得ることはなかなか困難となる。そのためリンクル現象に関する研究は、膜の曲げ剛性を零と仮定する膜理論に圧縮応力を負担しないという仮定を加えた張力場理論によるものがほとんどである。張力場理論による解析は解析の安定性や計算コストの点で圧倒的に優れており、求められた面内の応力状態によりリンクル形状などの面外現象を推定している。しかし、張力場理論はあくまでも近似理論であり、その適用範囲を明確にしておくことは構造工学上重要な課題である。また、将来の宇宙構造物を考えた場合、リンクルを許容するような膜構造物の解析は必要不可欠で、そのためにはリンクルおよびスラック（たるみ）を有する複雑な膜面形状を出来る限り正確に把握する必要がある。

本論文では、膜の微小な曲げ剛性を考慮した幾何学的非線形解析によりリンクルやスラックを有する膜面の面外特性を定量的に詳細に検討し、従来の張力場理論から導かれた解との違いを考察するとともに、実験による解析結果の検証、さらには膜面の包括的かつ定量的な形状解析法の提案を行っている。

第1章は序論であり、研究の背景、目的、および本論文の構成を述べている。

第2章では、本論文の数値解析で使用する幾何学的非線形有限要素法の概要を解説し、特に解の収束性と精度を向上させるために用いたディレクターの有限回転項を考慮した MITC (Mixed Interpolation of Tensorial Components) シェル要素の定式化を示している。

第3章では、前章で定式化した幾何学的非線形有限要素法をリンクル解析に適用する際に有意な解を得ることができる要素アスペクト比と解析ステップ比の範囲を求めている。また、得られた解と従来の研究における解析結果や実験結果とを比較して

本解析法がリンクル解析には適した解析法であることを示している。

第4章では、円形膜におけるリンクルの発生本数、方向、発生領域、および形状について定量的な検討を行っている。それらが構造スケール（代表長さ／膜厚）、初期張力、および回転軸半径といった構造パラメータによりどのように影響されるかを明らかにし、さらに載荷経路にも依存することを示して、複雑な非線形現象としてのリンクル現象の全体像を明確化している。

第5章は、円形膜および矩形膜について、特にリンクル現象の構造スケール依存性を詳細に検討して、従来のリンクル解析で広く用いられている張力場理論の問題点を定量的に指摘している。張力場理論においてリンクル領域外と判断される領域にもリンクル波が存在することや、張力場理論では無視している曲げ剛性の影響とリンクル領域内でリンクル波を拘束する境界付近に必ず存在する圧縮応力の影響とにより張力場理論より得られる解が実際とは異なること、リンクル現象の解析を張力場理論により行う場合には構造スケールが 1,000 以上の場合が望ましいことを明らかにしている。

第6章では、矩形膜の3点を固定し残りの1点に荷重して行った実験について述べている。膜面の詳細な変位計測により、本論文で用いた MITC シェル要素による幾何学的非線形有限要素解析の妥当性を確認し、リンクル現象の初期形状や構造スケール依存性を実験的にも明らかにした。さらに数値解析において仮定した完全固定の境界条件や荷重増分法による重力荷重の与え方が実際の実験の場合とは異なって、局所的にそれらの影響が現れることを指摘した。

第7章では、2次元フーリエ変換を用いた膜面の形状解析法（スペクトル解析法）を提案し、その方法によりリンクルやスラックの振幅、波長および発生方向の関係が包括的かつ定量的に表わせることを示している。第6章の実験結果に適用してその有効性を確認している。

第8章は結論であり、本研究の成果を要約している。

以上要するに、本論文は、膜の微小な曲げ剛性を考慮した幾何学的非線形有限要素解析や実験によりリンクルを有する膜面の面外特性を定量的に明らかにし、従来の張力場理論の適用範囲を明確にしたもので航空宇宙工学、構造工学、および建築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。