

京都大学	博士（工学）	氏名	高垣 利夫
論文題目	円筒から切り出されたシェルの特徴分析のための解析的および数値的研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文では、円筒から切り出され理想的な片持ち形式で支持されたシェルが、建築屋根構造に適した膜応力状態を実現するための条件を導くとともに、基礎式を解析的に解く方法と有限要素法によって数値的に解く方法により、そのシェルの力学的特徴を解明したものであり、5章で構成されている。各章の要旨は以下のとおりである。</p> <p>第1章は序論であり、建築の屋根として利用されるシェル構造を対象として、一对の母線と一对の円弧で円筒から切り出された矩形平面を持つ円筒シェルの力学的特性の問題点と構造解析における困難点を概観するとともに、円筒を曲線形状に切断したカットアウト片持ちシェルの概要を解説し、その力学的特徴と建築の屋根構造としての発展性を述べている。また、円筒シェルの有限要素解析について、既往の研究を概説するとともに、本論文で開発した円筒に特化した要素について、全ポテンシャルエネルギー停留原理に基づく弱形式からの定式化、曲率を剛性マトリックスに陽に保持する円筒形状の高次要素などの基本方針を述べている。</p> <p>第2章では、円筒カットアウト片持ちシェルにおいて、膜応力状態を実現するための釣合い微分方程式を導出し、それをひずみ-変位関係式とともに解析的に解いて変形と応力分布を求める手法を提案している。また、典型的な形状として、半円筒を余弦曲線で切断した形状のシェルを対象として、鉛直方向の自重と水平方向の地震荷重の下で膜応力が支配的になることを確認している。さらに、曲げ変形を考慮した薄肉円筒シェルの解析のための Donnell 式を用いて、エネルギー原理に基づく弱形式によって有限要素を開発し、上記モデルを解析して解析解と比較することによって精度を検証するとともに、曲げエネルギーを無視することにより、膜応力状態が得られることを確認している。この要素は3次の内挿関数を持ち、要素内の積分を完全積分で実行しており、円筒シェルの変位と応力を少ない要素数と自由度で高精度に解析できる。また、有限要素解析の結果より、理想的な膜応力状態を実現するための支持部分での変位仮定の影響が局所的であることを明らかにしている。</p> <p>第3章では、余弦曲線で切断された円筒カットアウト片持ちシェルを幅と厚さが変化する変断面アーチによって支持して形成される片持ちシェル-変断面アーチ連成構造の力学的特徴を解明している。まず、円弧方向に幅と厚さが変化する変断面円弧アーチの基礎式を、円筒シェルの基礎式から直接的に誘導している。また、円筒片持ちシェルと円形アーチの円弧方向変位-法線方向変位関係式の類似性から、両者の内部境界での変位の連続条件を導いている。さらに、アーチの厚さがシェルの厚さと比べて十分に大きい場合について、まずシェルを解析してその境界力をアーチに作用させて、連立微分方程式を解くことによって全体の変位と応力を求める手法を提案している。この手法を、内側に湾曲した一对の曲線で薄肉・厚肉に領域分割された部分円筒シェルに適用し、領域の分割形状を定めるパラメータを用いて、厚肉シェルのアーチとそれに支持される薄肉シェルの変位と応力の分布特性を解明し、薄肉シェルと厚肉シェルの板厚を適切に設定することによって力学的に優れたシェル構造を生成できることを確認している。第2章で開発した有限要素のひずみ-変位関係式を厚肉シェルに適用できるように Donnell 式から Flügge 式に変更し、有限要素解析と解析解による結果が十分な精度で一致することを確認している。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	高垣 利夫
<p>第4章では、円筒カットアウト片持ちシェルの薄さに起因する座屈特性を解明している。Loveの基礎式に基づく非線形釣合い方程式をオーダー評価により簡略化して座屈後釣合い式を導くことにより初期応力マトリックスを作成し、第2章で開発した有限要素解析プログラムを一般固有値問題として定式化される線形座屈解析に拡張している。自重と地震荷重の2種類の荷重を考慮し、形状と板厚のパラメータを変化させて、一般固有値問題を解いて線形座屈荷重と座屈モードを求めている。線形座屈荷重をそれらのパラメータ平面上の等高線としてプロットして、線形座屈荷重が十分に大きい値を持つことを確認し、典型的なパラメータ値での座屈モードを比較することにより、円筒カットアウト片持ちシェルの線形座屈性状を俯瞰的に示している。また、Greenの非線形ひずみ-変位関係式を用いて、第2章と同様のエネルギー原理により非線形弱形式を導き、初期剛性マトリックスと分離した変位依存剛性マトリックスを作成し、逐次増分解析のための線形化を行っている。荷重増分解析によって釣合い経路を追跡して大変形解析を行い、荷重の発散によって座屈を判定し、荷重発散時の変形を線形座屈モードと比較して座屈モードを決定している。その結果、幾何学的非線形性にとまなう座屈荷重の低下率は、円弧方向に全面圧縮状態にある自重載荷時では小さく、円弧方向に大きな引張り領域が存在する地震荷重では大きくなることを明らかにしている。</p> <p>第5章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

氏名	高垣 利夫
----	-------

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、円筒から切り出されたシェル構造を対象として、基礎式を解析的に解く方法と、有限要素法によって数値的に解く方法により、その力学的特徴を解明している。以下、論文の内容と得られた成果を記す。

(1) 円筒から切り出されたシェル構造が、片持ち形式で理想的に支持される場合、応力分布が膜応力状態となることを、釣合い微分方程式とひずみ-変位関係式を解いて変位と応力を求めることによって、解析的に明らかにした。また、円筒シェルの曲率の影響を正確に評価できる有限要素を開発し、上記のシェル構造に適用することにより、解析解と数値解が良好な精度で一致することを確認した。

(2) 厚肉シェルの両側に薄肉シェルを連結した部分円筒シェルについて、厚肉シェルを変断面アーチとしてモデル化することにより、薄肉シェルの膜理論と連結して解析解を得る方法を開発した。変断面アーチの基礎式は、厚肉円筒シェルの基礎式から母線方向の次元を削除して誘導している。また、変断面アーチと薄肉円筒シェルの基礎式には類似性があり、変位の連続性を保証し、アーチと薄肉シェルの境界形状と板厚を適切に設定すれば、理想的な膜応力状態を実現できることを示した。さらに、上記モデルに対して有限要素解析を実施し、数値解と解析解が良好な精度で一致することを示した。

(3) 上記(1)、(2)で開発した有限要素解析プログラムを拡張し、幾何学的非線形性を導入して線形座屈解析を行うことにより、円筒から切り出されたシェル構造の座屈特性を解明するとともに、板厚および形状パラメータと座屈荷重係数の関係を明らかにした。さらに、エネルギー原理から導いた非線形弱形式を逐次的に解く非線形有限要素法を開発し、座屈前変形の影響による座屈荷重の低下率を定量的に評価した。これらの成果により、円筒から切り出されたシェル構造を、理想的な膜応力状態で設計し、その特性を正確に評価することが可能となった。

本論文は、円筒から切り出されたシェル構造の特徴を解析的方法と数値的方法で解明したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成31年2月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。