

論文名： Study on Evaluation Method of Buckling Behavior of Thin-Walled Cylindrical Shell Using a Full-Field Optical Measurement

光学的全視野計測法を用いた薄肉円筒シェルの座屈挙動の評価法に関する研究

長崎大学大学院生産科学研究科

趙 程 (ジャオ チェン)

円筒シェルは軽量で高剛性であるので、航空宇宙構造物、海洋構造物をはじめ様々な分野で構造要素として多用されており、建設工学の分野においても貯蔵タンクや圧力容器などに数多く用いられている。円筒シェル構造部材は、供用期間中に軸圧縮力をはじめ様々な外力が作用し、座屈荷重によって耐荷力が決定されることが多い。特に、構造軽量化を図るために薄肉シェルが用いられる場合には座屈設計が重要な課題となる。

軸圧薄肉円筒シェルの座屈問題に関しては、古くから多くの実験的研究が実施されてきたが、実験には高コストを要するとともに、実験自体が難しく、また計測が極めて困難であるという理由から、座屈強度を決定するために、多くの解析的手法が提案されてきた。その主たるものはティモシェンコ (Timoshenko) による線形座屈解析である。しかしながら、軸圧薄肉円筒シェルの座屈前後の挙動は複雑で、その幾何学的初期不整が座屈強度に大きく影響を及ぼすため、実験による座屈強度値と理論的な予測値とに乖離が生じていた。そのため、非線形有限要素解析が実用的かつ有効な方法として活用されてきたが、実験結果を正確にシミュレートするにはまだ十分には至っていない。また、幾何学的初期不整に鋭敏な薄肉円筒シェル構造物の座屈強度を評価する設計原理である低減剛性法 (RS法: Reduced Stiffness Method) は、座屈荷重の下限値を与えるものである。さらに、実際の幾何学的初期不整は設計段階においては未知であり、その影響を考慮するため、NASAの設計ガイドライン (SP-800 7、1968年) においても下限曲線が与えられている。しかし、その座屈係数は薄肉構造の実際の強度を過小評価する場合もある。このように、薄肉円筒シェルの座屈強度値の算定にはまだ改善の余地が残されている。

薄肉円筒シェルの座屈強度を精度よく決定するためには、幾何学的初期不整の影響を検討し、その影響を設計に正確に取り入れる必要がある。その際、問題となるのは、形状や振幅などの幾何学的初期不整を適切かつ実用的に同定することである。本研究では、理論的、実験的および数値解析的に研究を実施した。

本論文では、まず、古典理論に基づいて軸圧縮荷重を受ける薄肉円筒シェルの理論モデルを初期不整の影響も考慮して誘導した。そして、その結果はNASAの設計ガイドラインの下限曲線と同じような結果になることを示した。次に、光学的手法であるデジタル画像相関法を用いて、薄肉円筒シェルの座屈前後の変形挙動を正確に計測し、座屈前後の三次元的な変形挙動の可視化を実現した。これはこの種の座屈問題において最も難解な座屈モードの選択性を明瞭に現わすものである。

さらに、数値解析により軸圧薄肉円筒シェルの座屈挙動を精度良くシミュレートするため

には、前述したように、幾何学的初期不整を解析モデルへ正確に取り入れることが重要となる。そのため、まず、薄肉円筒シェル試験体の幾何学的初期不整の三次元形状計測を実施した。その計測データから幾何学的初期不整を考慮した有限要素モデルを作成し、非線形座屈解析を実施した。同時に、同試験体に対して座屈実験を実施した。その結果、光学的全視野計測による実験結果と非線形座屈解析結果はよく一致することを示した。さらに、幾何学的初期不整を考慮していないモデルでの解析、各種の座屈理論解析、および本研究で得られた光学的全視野計測による実験結果との比較を行い、本手法の一連の計測・解析プロセスの有効性と有用性について検討するとともに、幾何学的初期不整が座屈挙動へ及ぼす影響を定量的に明らかにした。

本論文は全8章で構成されている。それぞれの章の内容は以下に示す通りである。

第1章では、概要と現在の研究の文献を調査するとともに、本論文の序言と構成について述べた。

第2章では、光学計測手法の概要とその利点について述べた。また、光学計測法の精度と全視野計測の有効性を評価するために、脆性材料からなる試験体の局部破壊に対して光学計測法を適用し、局部的な破壊に対するひずみ計測に本計測手法が有効であることを検証した。

第3章は、2つの部分で構成される。一つは、軸圧縮荷重を受ける薄肉円筒シェルの理論モデルを、古典理論に基づいて、初期不整の影響も考慮して誘導した。さらに、軸圧縮荷重を受ける円筒シェルの実験を行い、前記の光学的手法を使用して薄肉円筒シェルの座屈挙動を可視化するとともに、典型的な座屈前後の挙動を全視野変位情報として取得し、薄肉シェルの古典的座屈問題を直接的に解決できることを示した。

第4章では、3次元初期形状を取得するために、マッチング手法の一種であるデジタル画像相関法を用いて三次元形状計測を行い、実初期不整を数値シミュレーションに取り入れる汎用的な新しい方法を提案した。

第5章では、前章に述べた光学的手法を用いて得られた3次元形状を、薄肉円筒シェルの初期不整として数値シミュレーションに取り込むとともに、非線形座屈解析を実施し、その有効性について検討した。

第6章では、前章と同様な方法で有孔円筒シェルの座屈強度について検討した。実験結果と数値解析結果は良い一致を示した。

第7章では、ねじり荷重を受ける円筒シェルに対する実験的研究、およびレーザーホログラフィ干渉計測装置を用いた振動モードの計測について述べ、光学計測法の有効性を明らかにした。

第8章では、本研究の全体的な結論について述べるとともに、今後の研究課題について概説した。