

主 論 文 要 旨

報告番号	① 乙 第	号	氏 名	田中 真人
主 論 文 題 目 :				
ひずみ仮定を用いた非圧縮超弾性シェル要素の開発と薄肉円管の曲げ座屈解析への応用				
(内容の要旨)				
<p>非圧縮超弾性体による薄肉構造物の非線形有限要素解析手法は、工業・医療用途への応用として、ゴム高分子材料や生体軟組織等の薄肉柔軟構造物の特性の評価や予測のための構造解析手法として重要である。特に、柔軟材でできた薄肉円管の曲げ解析は、曲げ管の成形限界やエラストマシール材、医療チューブの設計、また血管のモデル化などに関わる工学的に重要な課題である。ゴムチューブのような薄肉円管に純曲げを与えると、はじめ断面が楕円形に扁平化し、曲げ剛性が低下する現象がみられる。さらに曲げを与え続けると、ある曲率を超えたところから断面がつぶれるような kink 現象が観察できる。断面の扁平化現象は Brazier らによって理論的に解明されたが、あくまで微小ひずみの仮定に基づく予測であり、管が現実不安定に至った前後の kink のメカニズムについては、その非線形性の強さから未だ系統的な結論を見出すに至っていない。</p> <p>一方、このような薄肉円管の有限要素解析を実施するためには、ソリッドではなくシェル構造要素を用いること、加えてゴム材のような大ひずみ特性を表現できる超弾性構成則を取り扱えることが、計算コスト、モデル化の手間、解析精度の観点から必須である。これまで、板厚の変化を加味するために新たな自由度を設けた大ひずみシェル要素等の開発が盛んに行われているが、シェル要素本来の利点である計算コスト、モデル化の手間が損なわれた複雑なものも多く、いまだ未解決の研究分野として超弾性シェル要素の開発が行われている。</p> <p>そこで本研究では、薄肉円管の Brazier 不安定問題に代表される強い非線形性現象を解析するための、高精度かつ効率的な有限要素による薄肉構造の解析手法の確立を目的とする。最初に高精度な 2 次元超弾性構成則を導入した非圧縮超弾性シェル要素を開発する。次に開発した要素を薄肉円管の純曲げ解析を含む種々の問題に適用し、提案する解析手法の有用性を示す。最後に、Brazier 現象を非線形不安定問題としてとらえたときの kink のメカニズムについて明らかにする。</p> <p>以下に、本論文の各章の内容について示す。</p> <p>第 1 章では、本研究における背景、目的および論文の全体構成について述べた。</p> <p>第 2 章では、本研究において必要となる超弾性体の定義および構成則の導出方法について概説した。</p> <p>第 3 章では、ひずみ仮定場を用いて、非圧縮超弾性解析のための大ひずみシェル要素を開発した。本シェル要素では面外せん断ひずみと板厚方向ひずみを要素内で仮定し、またシェルの面内平面応力条件から不定静水圧項を消去した。本定式化によって、新たに自由度を設けることなく、微小ひずみ要素と同じ変位・回転自由度のみで、非圧縮大ひずみシェル要素を実装することが可能となる。本提案要素は、従来大ひずみシェル要素と比べ、計算コスト・モデル化の手間に優位性がある。</p> <p>第 4 章では、主不変量を用いた Ogden 材料モデルの混合型ソリッド要素および大ひずみシェル要素の定式化を示した。本手法により、Mooney-Rivlin 材料モデルを拡張する形で Ogden 材料モデルの構成則を構築することが可能となり、固有値解析、主軸への座標変換などの数値計算を省略することができる。また、構成則を導く際に現れる未知係数の表現形式の選択によって、解の収束状況が変化することを示し、本手法の数値解析上の安定性について検討した。</p> <p>第 5 章では、前章までに開発した超弾性シェル要素を用いて薄肉円管の曲げ解析を実施した。まず、板厚の変化を無視した Hooke 弾性体による解析を実施し、Brazier の解との比較を行った。解析の結果、Brazier の解による屈服点より以前に互いに非常に近接した 2 つの座屈点があり、それぞれ分岐点と、snap back 現象が生じる極限点であることが明らかになった。このような極限点と分岐点が一致する臨界点は Hilltop 分岐点と呼ばれる。座屈後解析も実施し、主経路上では 2 つの kink は対称位置に生じ、分岐経路上では 1 つの kink が片折れの状態で発生することがわかった。次に、材料を Ogden 体に変えて同様の解析を行い、板厚の変化を考慮したゴムチューブの曲げ解析を実施した。本解析においても Hilltop 分岐点を確認でき、snap back 現象が生じる極限点と、2 つの分岐点が近接して現れることがわかった。また、Ogden 体の解析においても 2 つの kink が対称位置に生じることが観察されたが、kink の位置が Hooke 弾性体より内側に現れることを示した。</p> <p>第 6 章は総括であり、本論文で得られた知見および今後の課題について述べた。</p>				