

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 張 衛紅

本論文は注気膜構造を対象として、「膜構造の座屈後解析に関する研究」と題し、8章よりなる。

膜構造は様々な分野で応用されて来たが、代表的な例として、大型宇宙展開物や東京ドームのような大型構造物が挙げられる。膜構造は今後も様々な用途に供されていくと考えられるが、その一層の普及に当っては、定性的だけでなく、定量的な数値シミュレーションが合理的設計や安全性評価に不可欠であると考えられる。大型膜構造に加わる風荷重や雪荷重は不確定性が大きいため、設計の基準として相当保守的な静的荷重が用いられる。膜構造では膜材は非常に薄いため、圧縮力への抵抗が弱く、膜面に生じた圧縮応力はしわ状座屈を生じることにより開放される。しかしこのようなしわ状座屈を生じても、構造はすぐには崩壊しない。このため、膜構造の崩壊荷重を求めるには座屈後の応答を追跡する必要がある。ただし設計上は静的座屈が重要な指標となる。

本研究は、膜構造の極限的な変形まで解析することが可能な数値解析手法、及び効率よく静的荷重に対する崩壊荷重を評価することのできる数値解析手法を提案することを目的として、次のように構成されている。

第1章では、本研究の背景・目的及び関連分野における従来の研究を述べる。

第2章では二種類の Locking Free シェル要素、即ち3, 6 節点の Discrete Kirchhoff (DK) シェル要素, 9, 16 節点の Mixed Interpolation Tensorial Components (MITC) シェル要素, の具体的な定式を示す。

第3章では DKT シェル要素及び MITC シェル要素を用いて膜構造の解析における数値特性の検討を行い、DK 型シェル要素と MITC シェル要素はほぼ同じ数値特性を示すことを数値的に検証する。その上で膜構造の座屈後の変形経路・変形モード(しわ)がメッシュの分割に依存することや MITC4 シェル要素が計算効率の観点から膜構造の解析に適していることを数値的に検証する。

第4章では極限的な変形まで解析が可能な数値解析手法—DR(Dynamic Relaxation)法およびDR弧長法の具体的な定式を示す。また、DR法で用いられる時間積分法としてNewmark法、中央差分法及び γ -Dissipationを有する陽解法、DR法で用いられる質量マトリックスと減衰手法についても示す。

第5章では優れた効率で膜構造のDR解析を実行する為に、質量マトリックスとしては仮想質量マトリックス、減衰手法としては運動減衰とRushton及びUnderwoodの減衰、時間積分法としては中央差分法とNewmark法が挙げられることを数値的に検証する。なお、DR法及びDR弧長法は通常の弧長法で解析できない問題も解析できる。一般にDR解は粘性減衰を導入する時点や荷重履歴に依存し一つの経路上の解ではない。しかしDR弧長法では系の全弧長が拘束条件として導入される為、より連続的な解が求められる。

第6章では虚偽の高次モードが消去可能で、数値減衰を導入することができ、かつ非線形問題にも無条件安定であるEnergy Decaying解法—Generalized Energy Momentum法(GEMM)の定式化をMITC4要素について行う。

第7章では遅い荷重履歴速度で荷重を線形的に増加させ、準静的状態の構造応答をシミュレートすることにより崩壊荷重を評価する手法に関する数値的検討を行い、動的解析で用いる時間積分法、荷重履歴、時間増分ステップなどが崩壊荷重の評価に大きな影響を及ぼすことを数値的に検証する。

第8章「結論」では、以上の成果を総括している。

以上を要するに、本研究は注気膜構造のしわ状座屈発生後の崩壊荷重評価に対して有効な有限要素解析理論ならびに計算プログラムの開発を新たに行い、これにより従来解析が困難であった膜構造の極限的な変形までを解析する問題や、静的荷重に対する崩壊荷重を評価する問題に対して、数値解析の観点から多数の知見を得たものであって、工学上・工業上寄与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。