

数ある建築構造の一つであるアーチやドームといった大空間建築を実現する空間構造は建築形態と力学的構造が一体となり、形と力学との間には強い関連性を有している。近年では、計算機の急激な成長を背景に構造解析、シミュレーション技術及び施工技術が高度に発達し、複雑で幾何学にとらわれない自由な建築形態が求められるようになってきている。しかし、こうした技術の高度化は力学的に不合理と考えられるものまでも建設可能にするため、近年に見る構造物の設計例の中には建築家の求める力学的根拠のない形態をそのまま用いたものが多くあるのが現状である。不定形で自由な形態を有する曲面構造物の力学挙動は複雑で、直感的な評価に基づく形状決定は困難を極める。そのため、このような曲面構造物に対し、設計初期の構造計画段階において定量的な構造的指標による形態の提示を行い、建築計画の条件を勘案し、耐震・耐風設計等の設計段階へとつなげていく必要がある。

本論文は、大空間建築に多用されるシェル構造物の幾何学形状と密接に関係する力学特性である剛性および構造安定性を、曲面形状やシェル厚分布を変化させることにより制御する方法を理論的に論じたものである。この論文では、設計外力による仕事と等価である構造物のひずみエネルギーを指標として曲面形状とシェル厚分布を変化させることにより、弾性応答量を効果的に変化させることができること、曲面形状とシェル厚分布の同時最適化法にシェル厚をパラメータとして削除・付加を施す位相操作を組み込み、開口の位置と形状を同時に決定することができること、線形座屈荷重を指標として曲面形状を変化させることにより効果的に座屈荷重を大きくすることができること、最大の線形座屈荷重をもたらす曲面は構造安定性に富むものの、一般に低い剛性を示し、線形剛性と構造安定性との間には一定のトレードオフの関係があることなど、シェル構造の力学特性についての複数の重要な新しい知見を明らかにしている。

この論文は、理想的なシェル厚分布を求めるにあたり、まず、応力算定に用いる有限要素内の任意の点におけるシェル厚を各節点における値を用いて線形補間により表し、シェル厚分布を節点単位で離散化する工夫を施すことを行い、連続的なシェル厚分布を求めることを可能としている。そして、力学的に望ましい剛性を求めるため、設計外力による仕事と等価となる構造物のひずみエネルギーを目的関数、シェル厚および構造物の総体積を制約条件とした非線形計画問題を構成し、曲面形状とシェル厚分布を変数とする制約条件付き同時最適化問題の一般的な定式化を示している。これに基づき、大空間建築において支配的となる鉛直荷重を荷重条件とした単純幾何学形状のシェル構造物を例題とする数値解析を通して、ひずみエネルギーを極小とする曲面形状とシェル厚分布を導出し、更にこれらの力学特性を示すとともに、併せて、シェル厚の制約に基づき、構造要素の削除・付加を施す位相操作を構築し、前述した非線形計画問題を組み込み、シェル面上の開口の位置と形状を最適解として同時に導く手法を確立している。

また、構造安定性に富んだ曲面形状を求めることを目的として、設計上簡便な指標となる線形座屈荷重を目的関数に採用した非線形計画問題を定式化し、問題の解法として遺伝的アルゴリズムを利用することにより、感度係数を用いずに解探索を可能としている。この問題は通常、設計変数に対する感度を要し、解析過程で不連続性を生じる場合の扱いが問題の求解を困難にしていたが、本手法により、モデル入力における特別な事前の手続きを用いずに汎用的に解を求めることが可能となった。この手法を用いた詳細な数値解析により、最大剛性を実現するシェルと最大の線形座屈荷重を与えるシェルとの間にはトレードオフの関係があることを示している。

本論文の構成として、第1章では、構造形態の形と力の関連性について述べ、曲面構造物における設計初期段階での構造的指標となる曲面形態の提示の必要性と可能性について論じている。さらに、曲面構造物の形状及び厚み分布の決定問題と連続体シェルを対象とした構造安定性の向上を目的とする形状決定問題に関する既往の研究について論

じ、本研究の背景と研究の目的について述べている。

第2章では、本研究の理論準備として自由曲面シェル構造の構造形態創生手法に必要なスプライン関数とその発展形である NURBS について述べている。さらに単一目的最適化問題について、その解の概念と解法を詳説している。

第3章では、形状と厚さの同時最適化法による構造形態創生手法を提案するにあたり、厚み分布決定問題としての構造形態創生手法について述べている。本手法は、第2章で示した厚み分布の離散化手法に基づき、自由曲面シェル構造の厚み分布を NURBS により表現し未知量を低減させた上で、ひずみエネルギーを目的関数として採用し、シェル総体積一定のもと厚み分布の上下限制約を持つ制約条件つき単一目的最適化問題を定式化し、逐次二次計画法によりひずみエネルギーが極小となるときの厚み分布を導いている。さらに得られた厚み分布を有する曲面形状の力学特性についても論じている。

第4章では、形状及び厚み分布の同時決定による自由曲面シェル構造の構造形態創生手法を示している。本手法は曲面形状と厚み分布の双方を NURBS により表現し、ひずみエネルギーを目的関数として採用し、厚み分布の上下限值とシェル総体積の増減量に制約を有する制約条件つき単一目的同時最適化問題を定式化し、逐次二次計画法によりひずみエネルギーが極小となるときの曲面形状と厚み分布を同時に導くことを行っている。さらに得られた解曲面の力学特性についても論じている。

第5章は、第4章で示した構造形態創生手法に位相操作を組み込み、シェル面上の開口の位置と形状及びシェル厚を同時に求める構造形態創生手法を示している。設計問題として第4章と同様にひずみエネルギーを目的関数、厚み分布の上下限值とシェル総体積の増減量に制約を有する制約条件つき単一目的同時最適化問題を定式化し、シェル厚に応じて付加及び削除を施す位相操作を組み込み、ひずみエネルギーが極小となるときの解曲面の形状、シェル厚分布、開口位置及び開口形状を同時に導いている。

第6章では、連続体シェル構造を対象とし、構造安定性に富んだ曲面形状を求める構造形態創生手法を示している。目的関数として最も簡単な座屈荷重の指標である線形座屈荷重係数を採用し、形状に関する NURBS 制御点の空間座標を未知量に、形状決定問題を単一目的最適化問題として扱い、線形座屈荷重の最大化により構造安定性に富んだ曲面形状を求めている。一般に線形座屈荷重係数のような固有値を目的関数とする最適化問題では、最適解で複数の固有値が重複し、目的関数である線形座屈荷重係数の感度が設計変数に対し不連続となり、特別な工夫を施さない限り、感度解析に基づく数値計画法にて最適解を求めることが難しい傾向にある。そうした傾向をふまえ、本論文の手法で定式化する最適化問題の解法は感度を用いずに解探索が可能である遺伝的アルゴリズムを採用している。更には数値解析例では、4章で示した手法によるひずみエネルギー最小化による曲面形状との比較を行い、得られる曲面形状の力学特性についても併せて論じている。

第7章では本研究について総括し、今後の展望について述べている。