

論文の要旨

題目 幾何学的制約を考慮したシェル構造物の形状最適化
(Shape Optimization of Shell Structures Considering Geometrical Constraints)

氏名 藤田 慎之輔

本論文は、シェル構造物を対象とし、幾何学的制約を考慮した形状最適化手法を提案し、さまざまな形状の連続体シェルとラチスシェルの最適化例によって、手法の有効性を検証している。

本論文の内容および成果は以下のようにまとめられる。

第1章では、近年の建築デザインの動向について述べ、建築形態と力学的性能に強い相関を有するシェル構造物において、力学的性能のみならず、施工性、経済性、社会性、審美性など、優れた建築物の創造のために求められる多様な条件を満たす設計手法の開発の必要性について論じている。

さらに、シェル構造物の形状決定手法に関する既往の研究について論じ、本研究が求められるようになった背景と研究の目的について述べている。

第2章では、曲面の幾何学的特性を定量的に評価するために用いられる代数不変量について概説している。

微分幾何学における各種ベクトル、テンソル、ならびにそれらを用いて計算される代数不変量を、本論文で使用するテンソル積ベジエ曲面と三角形パッチベジエ曲面の2種類のパラメトリック曲面上において定義し、詳細な定式化を行っている。また、代数不変量の感度解析に必要な各種ベクトルおよびテンソルの制御点座標に関する導関数を導出している。さらに、曲面を鉄筋コンクリートシェルで実現する際に、型枠作成が容易で施工性に優れた曲面である可展面と線織面の特性について概説している。

第3章では、連続体シェルを対象として、ベジエ曲面を用いた形状記述によって未知量の数を低減させた上で、力学的性能の指標としてひずみエネルギーを採用し、意匠性や建築計画などに関わる幾何学的特性の指標として第2章で概説した代数不変量を採用することにより、力学的合理性と幾何学的特性の双方を考慮したシェル形状を求めるための新しい形状最適化手法を提案している。

地形学の分野において、国土の標高関数から抽出されるデータをもとに、山谷などの地形の特性を定量化することを目的として提案された代数不変量を、シェル曲面の幾何学的特性を定量的に測る尺度として利用している。それらの代数不変量に加えて、球らしさを定量的に評価するための新たな代数不変量も提案している。

数値解析例では、テンソル積ベジエ曲面あるいは三角形パッチベジエ曲面で形状記述されるさまざまなシェル構造を対象として、提案手法の有効性と汎用性を検証している。これらの例を通じて、本手法により、力学的合理性を大きく損なわずに、曲面の凹凸、山谷、球らしさなどの意匠性や建築計画に関わる幾何学的特性を定量的にコントロール可能であることを示している。

第4章では、ひずみエネルギーに加えて、施工性に関わる幾何学的な特性として、曲面の平面への展開可能条件（可展条件）を導入することにより、力学的合理性と施工性の双方を考慮した連続体シェル形状を求めるための新しい形状最適化手法を提案している。

シェル全体を可展面とすることは幾何学的な制約の厳しさから難しいため、曲面をいくつかの区分領域に分割し、それぞれを独立に可展面とし、それらの連結によって形成されるシェル形状（区分的可展面）を創生することで、上記の問題点を解決している。

数値解析例では、テンソル積ベジエ曲面あるいは三角形パッチベジエ曲面を用いてさまざまな形状のシェル構造を最適化し、提案手法の有効性と汎用性を検証している。これらの例を通じて、本手法により、力学的合理性を大きく損なうことなしに、線織面よりもさらに施工性に優れた曲面である可展面で構成されるシェル形状が創生可能であることを示している。さらに、本手法により得られた展開図をもとに、区分的可展面の模型を作製している。

第5章では、連続体シェルを対象として、型枠作成が容易であり実構造物にも多く利用されている線織面に着目し、2つのベジエ曲線のパラメータの等しい点を結んだ直線の集合で線織面を定義し、ベジエ曲線の制御点座標を設計変数としてひずみエネルギーを最小化し、高い力学的合理性を有する線織面形状を得るための形状最適化手法を提案している。

対称性を有する整形な曲面でガウス曲率が正の曲面、負の曲面、ならびに不整形な曲面として分類される幾何学的特徴の異なる3種類の解析モデルを対象として、提案手法の有効性と汎用性を検証している。曲面形状の多様性を確保するため、ベジエ曲面の制御点を、空間内の3方向に移動可能とした場合、シェル全体の水平投影面積や要素の面積の消失にともなう非現実的な形状となることを例示し、そのような問題点を回避するため、これらの面積と要素の辺長のばらつきを制約する最適化問題を定式化している。また、本手法により得られる解の多くは、局所的最適解に収束するが、初期解を適切に選択することによって、線織面で構成され、かつ力学的に合理的なシェル形状が創生可能であることを示している。

第6章では、骨組部材で構成されるラチスシェルを対象として、ひずみエネルギーに加えて、施工性に関わる幾何学的特性量として、部材長一様性に着目し、部材長の平均値からの差の2乗和を評価指標とすることで、力学的合理性と施工性の双方を考慮したシェル形状を求めるための形状最適化手法を提案している。また、三角形パッチベジエ曲面あるいはテンソル積ベジエ曲面で形状記述することによって未知量の数を低減している。

しかし、部材長を完全に一様化することは困難であり、曲面形状、境界条件および節点の不動条件によっては部材長一様解が存在しないことがある。そのような場合においても、部材長の平均値からの差の2乗和を目的関数として最小化することによって、可能な限り部材長を一様化するとともに、非現実的な解を回避できることを示している。

部材長の一様化により、施工管理が容易になり、部材角を制限することも可能であり、施工性の向上が期待できると考えられる。ただし、三角形グリッドで構成されるラチスシェルでは、部材長一様化によって部材間の角度が60度に限定されるため、接合部の部品を均一化できるというメリットがある反面、形成可能な形状は極めて限定的となる。このような問題点を回避するため、部材を適切にグルーピングして最適化することで、制御点座標を設計変数として、高い剛性を保ち、かつグループごとに部材長が一様なラチスシェルが得られることを示している。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果を要約している。