

京都大学	博士（工学）	氏名	沈 偉
論文題目	Shape and topology optimization of frame structures considering uncertainty in variables and parameters (変数とパラメータの不確定性を考慮した骨組構造物の形状と位相の最適化)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、静的载荷を受ける平面骨組構造を対象とし、部材断面積や節点座標などの設計変数と材料特性を定めるパラメータの不確定性を考慮して、骨組の形状（節点位置）と位相（部材配置と部材断面積）を最適化する手法を提案したものであり、6章からなっている。各章の要旨は以下のとおりである。</p> <p>第1章は序論であり、骨組構造の形状と位相の同時最適化、パラメータの不確定性を考慮した最適化および構造の安定性を考慮した最適化における既往の研究を概観し、解決すべき問題点を整理するとともに、本論の目的と構成を示している。</p> <p>第2章では、第3章以降で用いる軸力密度法（軸力の部材長に対する比を変数とする方法）、確率変数の順序統計量とLモーメントを概説し、骨組部材の剛性における節点位置の不確定性のモデル化手法と、不確定性を考慮しない最適化問題における最適解の不安定性にともなう問題点をまとめている。</p> <p>第3章では、骨組構造の部材体積に関する制約の下で形状と位相を同時に最適化する問題を対象として、最適化の過程で節点が重複して解析が困難になる問題点を解決するため、ケーブルネットなどの張力構造の形状設計で利用される軸力密度法を用いて補助的な構造の形状を定義し、軸力密度の上下制限により部材長の範囲を間接的に制限する手法を提案している。また、コンプライアンス（ひずみエネルギーの2倍）を最小化する問題を対象として、上記の手法を用いてさまざまな支持条件と荷重条件の平面骨組の最適な形状と位相を求めて、ピン接合トラスの最適解と比較することにより、骨組構造では曲げにともなうせん断力に抵抗するため細い部材が必要になる場合があることを例示している。さらに、軸力密度の符号を限定しないモデルと正に限定したモデルによって形状を定義した場合を比較し、両者で得られる解はほぼ同じであるが、正に限定した方が収束が早いことを示している。</p> <p>第4章では、節点位置や部材断面積を設計変数とし、設計変数と材料定数のパラメータに不確定性を有するロバスト最適化問題において、最悪応答量を応答量分布の分位数（分位応答量）に緩和して、順序統計量を用いて定式化する手法を提案している。順序統計量を用いることにより、パラメータの不確定性の分布を仮定せず、特定の応答量に関する構造物のロバスト性とその信頼度を、順序統計量のノンパラメトリック片側許容区間に基づいて、採用したサンプル数と順序（オーダー）によって調整できる。また、部材体積に関する制約の下で最大応力を最小化する問題において、パラメータの不確定性を考慮せずに最適すると、不安定な解が得られることを示している。不安定性を回避するために線形座屈荷重を制約して最適化すると、極めて細い部材に生じる疑似的な個材座屈を制限することによって最適な位相が得られないという問題点を解決するため、細い部材の幾何剛性にペナルティを与える手法を提案し、その有効性を小規模骨組の例題で確認している。その際、部材を4個の要素</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	沈 偉
------	--------	----	-----

に分割し、節点位置と部材の不整を相関のある2種類の確率変数でモデル化している。さらに、さまざまなロバスト性レベルに対応する応答量の最小化を目的とした2段階の多目的最適化手法を提案している。その第1段階ではパラメータの不確定性を考慮せず、部材体積の制約の下で最大応力を最小化する単一目的最適化問題を、部材断面積と節点座標を変数として解いている。第2段階ではパラメータの不確定性を考慮して、最大応力のさまざまなレベルの順序統計量あるいはそのトリム平均（連続する順序統計量の平均値）を目的関数とする多目的最適化問題を解き、さまざまなロバスト性レベルに対応する応答量の最小化を目的としたパレート最適解集合を求めている。その結果、トリム平均を用いると単純な順序統計量を用いた場合よりパラメータの不確定性に対する解の変動が減少することを示している。

第5章では、静的荷重に対する応答量の信頼性に関する制約を分位応答量で定式化し、信頼性設計に基づく最適解を求める手法を提案している。信頼性を考慮した最適化の過程を、応答量の上限値を分位応答量に基づいて逐次的に変更して確定的な最適化問題を解く過程に変換している。その際、信頼性が過度に高く、高コストな解が得られることを回避するため、一つの応答量がほぼ上限値に等しくなるような終了条件を導入している。また、サンプルLモーメントに関する制約の下でのエントロピー最大化問題をラグランジュ乗数法を用いて解くことにより、分位応答量の密度関数を少ないサンプルで近似し、分位応答量の密度関数の積分によって指定された信頼性に対応する分位応答量を求めて、骨組構造物の応答量の信頼性を精度よく評価できることを示している。提案した定式化を用いて、パラメータの分布を一様分布と仮定し、変位制約の下で部材体積を最小化する問題と、変位と線形座屈荷重制約の下で部材体積を最小化する問題それぞれに対する最適解を求めて、線形座屈荷重制約を与えることによって最適解の安定性が保証されることを示している。非線形計画法を繰返し適用して確定的な最適化問題を解く過程で線形座屈荷重の不連続性によって生じる解の振動は、上限値の修正量を低減する係数を用いることによって軽減できる。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

氏名	沈偉
----	----

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、静的荷重を受ける平面骨組構造を対象として、変数とパラメータの不確定性を考慮した形状と位相の最適化手法を提案している。以下、その内容と得られた結果を記す。

(1) 平面骨組構造の節点位置を変数とした形状最適化の過程で節点が重複して解析が困難になる問題点を解決するため、軸力密度法を用いて補助的な構造の形状を定義し、軸力密度の上下制限約により部材長の範囲を間接的に制限する手法を提案した。また、軸力密度の符号を正に限定することにより、限定しない場合とほぼ同じ解を少ない計算時間で得ることができることを示した。

(2) 上記(1)の手法を用いて、さまざまな支持条件と荷重条件の平面骨組構造の最適な形状と位相を求めて、ピン接合トラスの最適解と比較することにより、骨組構造では曲げにともなうせん断力に抵抗するため細い部材が必要になる場合があることを示した。

(3) 線形座屈荷重を考慮した位相最適化において、極めて細い部材に生じる疑似的な個材座屈を制限するため、細い部材の幾何剛性にペナルティーを与える手法を提案した。

(4) 節点位置と部材断面積を設計変数とし、設計変数と材料定数などのパラメータに不確定性を有する骨組のロバスト最適化問題において、最悪応答量を分位応答量に緩和し、順序統計量を用いて定式化する手法を提案した。その際、順序応答量のサンプル数と順序によって応答量の制約に対するロバスト性と信頼度を調整できることを示した。

(5) 不確定性を有する応答量のさまざまなレベルの順序統計量あるいはそのトリム平均を目的関数とする多目的最適化問題を定式化し、さまざまなロバスト性レベルに対応するパレート最適解集合を求めた。さらに、トリム平均を用いると単純な順序統計量を用いた場合よりパラメータの不確定性に対する解の変動が減少することを示した。

(6) 静的荷重に対する応答量の信頼性に関する制約を分位応答量で定式化し、応答量の上限値を逐次的に変更して確定的な最適化問題を解き、信頼性設計に基づく最適解を求める手法を提案した。

(7) サンプル L モーメントを制約したエントロピー最適化によって、分位応答量の密度関数を少ないサンプルで近似して、骨組構造の信頼性を精度よく評価するとともに、信頼性が過度に高く、高コストな解が得られることを回避できることを示した。

本論文は、平面骨組構造の変数とパラメータの不確定性を考慮して、その形状と位相の最適化手法を提案したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年1月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。