

氏名	張 景 耀
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	工博第2856号
学位授与の日付	平成19年9月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工学研究科建築学専攻
学位論文題目	STRUCTURAL MORPHOLOGY AND STABILITY OF TENSEGRITY STRUCTURES (テンセグリティ構造の形態創生・安定性に関する研究)
論文調査委員	(主査) 教授 加藤直樹 教授 上谷宏二 准教授 大崎 純

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、ケーブルとストラットで構成されるテンセグリティ構造物を対象として、自己釣り合い状態における形状と軸力の設計法と、安定性評価法を提案したものであり、全11章から構成されている。

第1章は、序論であり、テンセグリティ構造物が創造された経緯から、工学、数学及び医学などの広い分野での歴史と応用例を記述している。また、テンセグリティ構造の力学的特性を明確にし、その力学的原理や設計法が未確立である現状を説明して、新しい実用的手法を提案する必要性を述べている。さらに、テンセグリティ構造物の形状決定法と安定性条件に関する既往の研究を調査することにより、本論文の位置付けを示している。

第2章では、テンセグリティ構造物に関する基礎式を導いている。まず、一般的ピン接合構造の自己釣り合い方程式と剛性行列を導き、構造物の安定性を評価するため、三つの安定性基準(stability, prestress stability, super stability)の関係を議論している。次に、ピン接合構造の安定性の定義に基づいて、ピン接合構造を、トラス、ケーブルネット及びテンセグリティ構造物に分類している。テンセグリティ構造物には圧縮と引張のみにそれぞれ抵抗する部材が存在するので、その安定性はトラスやケーブルネットのように明確ではない。さらに、自己釣り合い状態においてテンセグリティ構造の形状が退化しない条件を、軸力密度行列のランクを用いて導出している。

第3章では、テンセグリティ構造物の安定性条件を導いている。まず、幾何剛性行列の零空間が非自明アフィンモーションで構成されることを証明し、それに基づいて安定性の必要条件を導き、さらに、幾何剛性行列の半正定値性とランクに基づいて、安定性の十分条件を導いている。また、線形剛性行列と幾何剛性行列の零空間の線形独立性に基づいて、テンセグリティ構造物の安定性を議論し、安定性に関わる種々の条件を証明している。

第4章では、軸力密度(軸力の長さに対する比)の概念を利用して、計算効率の良い形状決定法を提案している。本手法では、軸力密度行列のスペクトル分解あるいは特異値分解に基づき、第2章で示した非退化条件を満足する軸力密度を求めて、線形独立な節点座標を指定して形状を一意に決めることができる。さらに、本手法を用いると、幾何学制約を軸力と節点座標に関する線形方程式によって定式化し、super stabilityの条件を満たすさまざまな釣り合い形状を、設計要求にしたがってコントロールすることができる。

第5章では、テンセグリティ構造物を有向グラフでモデル化して、部材の方向を正確にコントロールできる手法を提案している。テンセグリティ構造物の部材には軸力のみが存在するので、部材の方向と軸力ベクトルの方向は一致し、自己釣り合い方程式は軸力と部材方向に関する線形方程式となるので、それぞれの独立な成分を指定することによって構造物の軸力分布と形状を一意に決めることができる。さらに、有向グラフで表現された構造物の非退化条件を導き、部材方向の指定値からの偏差を最小化するための最適形状決定法を提案している。

第6章では、群の表現理論に基づいて、二面体群対称性を有する構造物の軸力密度行列、幾何剛性行列、釣り合い行列及びメカニズムのブロック対角化表現を解析的に導いている。構造物の節点軌道が一つしかない場合について、軸力密度行列と

幾何剛性行列の対角成分を、軸力密度に対応する既約あるいは非既約表現の直和で定式化し、釣合い行列の対角成分が部材の軌道及びその単位方向ベクトルによって定式化できることを示している。行列のブロック対角化より、構造解析と安定解析の計算量を大幅に低減できるとともに、解析的定式化によって構造物の力学特性を解明することが可能となる。

第7章では、二面体群対称性をもつ prismatic 構造を対象とし、その自己釣合い形状と安定性を検討している。構造物の対称性によって、構造全体ではなくその代表点の自己釣合い方程式のみで安定性を判定できることを示している。第6章のブロック対角化に基づく定式化によって、水平ケーブルが隣接節点に接続する場合に prismatic 構造は super stability の条件を満たし、その prestress stability は水平及び鉛直ケーブルの接続関係と、高さの半径に対する比に依存することを明らかにしている。

第8章では、同じく二面体群対称性を有する star-shaped 構造の安定性を議論している。Star-shaped 構造には二つの節点軌道があり、prismatic 構造より多いメカニズムが存在するにもかかわらず、第6章のブロック対角化の定式化によって、奇数の棒材を有し、棒材間の距離が最小となる場合、star-shaped 構造は super stability の条件を満たすことを証明している。また、prestress stability の条件を満たす特定の構造が、複数の安定形状を有し、外力を与えることによって一つの安定形状から他の安定形状に到達できることを、数値解析と物理実験で確認している。

第9章では、複数の軸力モードを有する構造物を対象として、その最適な軸力分布を求めるための軸力設計法を提案している。構造物の軸力分布は軸力モードの線形結合で定義され、剛性に大きな影響を与えるので、剛性行列の最小固有値の最大化及び軸力偏差の最小化のための2目的最適化問題を定式化している。また、構造物の力学特性への軸力分布の影響を検討し、軸力設計のための意思決定を支援するため、制約法を用いて2目的最適化問題のパレート最適解を列挙している。

第10章では、施工中と施工後の軸力管理のため、擬似焼きなまし法を用いて、テンセグリティ構造物の軸力分布の同定誤差を最小化するような軸力の最適計測位置を求める手法を提案している。同定誤差の定式化には、軸力に加えて節点座標の計測誤差も考慮している。また、擬似焼きなまし法の初期解を stingy 法で与えることによって、近似最適解を効率よく求めることができることを示している。

第11章は、結論であり、本論文で得られた成果を要約し、将来の研究課題を検討している。

論文審査の結果の要旨

本論文では、ケーブルとストラットで構成されるテンセグリティ構造物を対象として、自己釣り合い状態における形状と軸力の設計法と、安定性評価法を提案している。テンセグリティ構造物は、部材軸力と節点位置が連成するため、その設計および安定性評価において多くの未解決な問題点が存在する。それに対して、本論で得られた成果は以下のように要約される。

1. 一般のピン接合構造を、自己釣り合い軸力の存在と部材軸力の符号に基づく安定性条件によって、トラス、ケーブルネット、テンセグリティ構造物に分類した。さらに、線形剛性行列と幾何剛性行列の零空間の線形独立性に基づいて、テンセグリティ構造物の安定性を議論した。

2. 幾何剛性行列の零空間を構成する非自明アフィンモーションに基づいて、安定性の必要条件を導き、さらに、幾何剛性行列の半正定値性とランクに基づいて、安定性の十分条件を導いた。

3. 軸力密度行列のスペクトル分解あるいは特異値分解に基づき、非退化条件を満足する軸力密度を求めて、線形独立な節点座標を指定して形状を一意に決定する手法を提案した。本手法によると、線形幾何学制約の導入によって、さまざまな釣り合い形状を生成できる。

4. 構造物を有向グラフでモデルして、さまざまな制約条件を満たす軸力と節点座標成分を直接指定することにより、部材の方向を正確にコントロールできる手法を提案した。さらに、軸力成分の目標値との偏差及び制約条件の誤差を最小化するような最適化問題を定式化した。

5. 対称性を有する構造物を対象として、群の表現理論を用いて、軸力密度行列、剛性行列及び釣り合い行列のブロック対角化の解析的表現を導いた。これらの表現に基づいて、二面体群対称性を有するテンセグリティの安定性について一般的な十分条件を導いた。

6. 複数の軸力モードを有する構造物を対象として、剛性の最大化および軸力偏差の最小化を目的とした2目的最適化問題を定式化し、制約法を用いてパレート最適解を列挙した。

7. 施工中と施工後の軸力管理のため、擬似焼きなまし法を用いて、テンセグリティ構造物の軸力分布の同定誤差を最小化するような軸力の最適計測位置を求める手法を提案した。

以上、本論文は、群論、グラフ理論、最適化手法などの数学理論及び力学的原理に基づいて、テンセグリティ構造物の形態創生手法を開発し、安定性条件を導出したものであり、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、平成19年8月27日、論文内容とそれに関連した事項について諮問を行った結果、合格と認めた。