

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：23903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760458

研究課題名(和文) 対称性を利用した張力空間構造の座屈解析および最適設計法

研究課題名(英文) Buckling Analysis and Optimal Design of Prestressed Spatial Structures using Symmetry

研究代表者

張 景耀 (Zhang, Jingyao)

名古屋市立大学・芸術工学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50546736

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：膜構造、ケーブルドーム、張弦梁やテンセグリティ構造などを代表とした張力空間構造は、その部材にあらかじめ張力を導入することによって軽量化し、耐震性能を大幅に向上させるため、大きな空間を効率よく覆うことができる。

しかし、張力空間構造の形態が設計者の期待とおりに設計されるのは難しく、その安定性および座屈挙動も十分に解明されていない。本研究では、その対称性を活用し、これら張力空間構造特有の設計問題に対して新しい方法の提案を目的とする。

研究成果の概要(英文)：Prestressed spatial structures, including membrane structures, cable-domes and tensegrity structures, are very light due to the introduction of prestress in their structural elements. Hence, they can be used as long-span structures to cover a very large space without columns, and they are very strong in earthquakes.

However, it is difficult to determine their (self-equilibrated) configurations as expected by the designers due to the existence of prestress; and moreover, their stability at self-equilibrium state and buckling behavior while subjected to external loads are great concerns in the design of these structures. In this study, we are to present novel design methodologies for these problems, especially making use of their symmetry.

研究分野：建築構造

キーワード：対称性 安定性 張力空間構造 テンセグリティ ケーブルネット 形状決定 非線形解析 最適化

1. 研究開始当初の背景

膜構造、ケーブルドーム、張弦梁やテンセグリティ構造などを代表とした張力空間構造は、その部材にあらかじめ張力を導入することによって軽量化し、耐震性能を大幅に向上させるため、大きな空間を効率よく覆うことができる。しかし、通常の空間構造より、張力・形状の設計および維持管理が難しいため、実用化には困難点が多い。

また、張力空間構造は体育館や公民館など大きな空間が必要となる構造物に利用され、災害時の避難所として非常に重要な社会的存在であるが、その形態が設計者の期待とおり設計されるのは難しく、その安定性および座屈挙動は十分に解明されていない。

構造物の対称性は、構造解析の計算量を低減するため、昔から利用されている。この中でも、構造物の幾何学的対称性に基づいた座標変換により、支配方程式を複数の独立な式に分解する行列のブロック対角化理論は、最もシステムマッチな手法である。従来手法を用いた場合にできなかった構造物の本質的力学特性の解明も可能となる。

2. 研究の目的

高い対称性を有する構造物は、意匠的または力学的にも優れ、実用的によく採用されている。従い、本研究では、テンセグリティやケーブルネットを代表とした張力空間構造に対して、下記の手法の開発および提案を目的とする。

- (1) 自己釣合い形態を決める方法。
- (2) 不安定構造の非線形解析法。
- (3) 高い対称性を利用した安定性調査法。

3. 研究の方法

(1) 既存手法の検討：

直感的手法から数値的手法や解析的手法まで、数多くの構造物の対称性を利用した既存手法を分類し、それぞれの理論根拠を追求し、短所および長所を明確にする。

(2) 幾何剛性行列のブロック対角化

既往研究では、二面体群対称性の構造物に対して、幾何剛性行列を解析的にブロック対角化する定式化を導いた。この定式化の考え方に基づき、構造物の対称性と群の規約表現を利用し、任意の点群対称性に適応できる解析的手法を提案する。

(3) 不安定構造の解析法

不安定な構造物の非線形解析に対しては、不安定なメカニズムおよび剛体変位を排除できる一般逆行列に基づいた解析法を開発する。また、静的（自己釣合い）問題を動的問題として取り扱う動的緩和法を採用し、その収束性を向上する方法を提案する。

(4) 最適設計法の提案

上記の成果に基づいて、構造性能および経済性両方を設計の評価指標とする最適化問題を考慮する。離散系である張力空間構造の最適設計問題に対しては、断面設計の

ためのヒューリスティクスと、形状設計のための数理計画法を融合した最適化手法を提案する。

4. 研究成果

- (1) 一つの正則な節点軌道を有する点群対称性のテンセグリティ構造を主な研究対象とした。その高い対称性を利用し、群の表現理論に基づいて、その軸力密度行列を独立なブロックを対角成分とした形式に分解する定式化を提案した。軸力密度行列の固有値を求める際に、対象となる子行列（ブロック）のサイズは極めて小さいため、解析的な安定性条件式の誘導が可能となった。
- (2) 四面体群対称性を有するテンセグリティ構造に対して、その自己釣合い状態における異なる種類の部材の軸力モード（軸力密度）を解析的に求めることができた。さらに、ブロック対角化された軸力密度行列の子行列の固有値を計算し、その無条件的安定となる条件式を誘導することができた。
- (3) 二面体群対称をもつ角柱状テンセグリティ構造を研究対象として、その高い対称性を利用し、軸力密度行列のブロック対角化により、水平ケーブルが隣接節点につながる場合に無条件安定となることを、既往研究より一般性のある方法によって証明した。
- (4) テンセグリティ・アーチやタワーなど複雑な形状を有する構造物の形態創生のため、動的緩和法を採用した。より単純なテンセグリティ構造を対象とし、解析パラメータをチューニングしてその収束性能を向上させる方法を提案した。複雑なテンセグリティ構造の例題により、提案手法は設計者の望ましい形状に収束できる有力な方法だと考えられる。
- (5) 指定形状に近づけるように、一般逆行列を使用した不安定構造のための非線形解析法と、最適化技術を融合したテンセグリティ構造の形状決定法を提案した。この提案手法によっては、設計者に指定された形状に解を得ることができる。
- (6) テンセグリティ構造の形状決定と展開プロセスのシミュレーションをひとつの最適化問題として統一した。また、多様な形状を生成できるように、仮想材料に関する定式化を提案した。更に、目的関数の局所的凸性について検討した。提案手法が適応しにくいケーブルの初期長さが小さい場合に、アフィン変換を利用した代替方法も提案した。
- (7) 逆懸垂系連続アーチの解体創生に、滑動節点をもつケーブルの自重解析法を提案した。曲線構造の解析には、CADと同様の関数で表現することでデータ変換が不要となる Isogeometric Analysis を採用した。また、非線形の強い不安定構

造の解析には一般逆行列を利用した。力学的合理性のある連続アーチの様々な形態を獲得できた。また、反転圧縮場において、滑動解析によって得られた形態は空間内部の水平方向成分の力がゼロになるだけでなく、アーチ境界に生じる曲げモーメントが小さい軸力支配型の連続アーチになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

- 1) 原田 桂吾, 張 景耀, 小河 利行, Isogeometric Analysis に基づいたケーブル構造の自己釣合解析に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 60B, pp. 137-142, 2014.
- 2) M. Ohsaki and J.Y. Zhang, Prediction of inelastic seismic responses of arch-type long-span structures using a series of multimodal pushover analysis, Journal of IASS, Vol. 54(1), pp. 27-37, 2013.
- 3) J.Y. Zhang and M. Ohsaki, Self-equilibrium and stability of regular truncated tetrahedral tensegrity structures, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 60(10), pp. 1757-1770, 2012.
- 4) M. Ohsaki, J.Y. Zhang and I. Elishakoff, Multiobjective hybrid optimization-antioptimization for force design of tensegrity structures. Journal of Applied Mechanics, Vol. 79(2), pp. 021015-1-8, 2012.

[学会発表](計10件)

- 1) J.Y. Zhang and M. Ohsaki, Free-form Design of Tensegrity Structures by Combination of Non-linear Analysis and Optimization Techniques, 11th Asia Pacific Conference on Shell and Spatial Structure (APCS 2015), Xi'an, China, May 2015. (Best Paper)
- 2) J.Y. Zhang and M. Ohsaki, (Keynote) Form-finding of Tensegrity Structures by using Non-linear Analysis, Proc. The 5th International Conference on Computational Methods, Cambridge, UK, July 2014.
- 3) M. Ohsaki, J.Y. Zhang and T. Taguchi, Form-Finding and Stability Analysis of Tensegrity Structures using Nonlinear Programming and Fictitious Material Properties, Proc. The 5th International Conference on Computational Methods, Cambridge, UK, July 2014.
- 4) K. Harada, J.Y. Zhang and T. Ogawa, Self-equilibrium Analysis of Cable Structures based on Isogeometric Analysis, Proc. The 5th International Conference on

Computational Methods, Cambridge, UK, July 2014.

- 5) J.Y. Zhang and M. Ohsaki, Free-form design of tensegrity structures by non-rigid-body motion analysis, Proc. International Association for Shell and Spatial Structures, Wroclaw, Poland, Sep. 2013.
- 6) 原田 桂吾, 張 景耀, Isogeometric Analysis に基づいたケーブル構造の形態解析に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 2013.
- 7) 藤田 直人, 大崎 純, 張 景耀, ひずみエネルギー最小化とペナルティー法によるテンセグリティの釣合形状決定法, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 2013.
- 8) 張 景耀, 大崎 純, 切頂六面体テンセグリティ構造の自己釣合と安定性条件, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 2013.
- 9) J.Y. Zhang and M. Ohsaki, Analytical Conditions for Self-equilibrium and Super-stability of Tensegrity Structures with Tetrahedral Symmetry, Proc. IASS-APCS 2012, Seoul, Korea, May 2012.
- 10) J.Y. Zhang and M. Ohsaki, Free-form Design of Tensegrity Structures by Dynamic Relaxation Method, Proc. IASS-IACM 2012, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, April 2012.

[図書](計1件)

- 1) J.Y. Zhang and M. Ohsaki, Tensegrity Structures: Form, Stability, and Symmetry, Mathematics for Industry 6, Springer, 2015.

[産業財産権]

○出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://zhang.aistructure.net/links/tensegritylinks/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

張 景耀 (名古屋市立大学大学院芸術工
学研究科・准教授)

研究者番号：50546736

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：