

機関番号：34315

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21860081

研究課題名（和文） 対称性を利用した張力空間構造の安定解析と設計法

研究課題名（英文） Stability analysis and design methodologies for prestressed spatial Structures using symmetry

研究代表者

張 景耀 (ZHANG JINGYAO)

立命館大学・理工学部・講師

研究者番号：50546736

研究成果の概要（和文）：

構造解析の計算量を低減し、本質的力学特性を解明するために、構造物の対称性は古くから利用されている。この中でも、元の行列をからサイズの小さい子行列を抽出するための行列のブロック対角化は最も有効な手法だと考えられる。

本研究では、構造物の対称性を有効に利用し、構造解析にかかわる行列のブロック対角化のため群論を用いて定式化した。さらに、二面体群および四面体群対称性を有するテンセグリティ構造物の安定性調査のために、一般的安定性条件及び無条件安定性条件を導く。

研究成果の概要（英文）：

Symmetry properties of a structure has been utilized to simplify the computational cost of structural analysis, or even to illustrate the intrinsic mechanical properties of the structure, from long time ago. Among all the existing methods, the block-diagonalization, which is to extract independent and small sub-matrices from the initial matrix, is considered to be the most effective one.

In this study, we presented the analytical formulation for block-diagonalization of matrices related to structural analysis, by application of group representation theory, and making use of symmetry properties of the structures. Furthermore, the necessary and sufficient conditions for super stability of the tensegrity structures with dihedral and tetrahedral symmetries have been proved by using the presented formulations.

交付決定額

（金額単位：円）

|         | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2009 年度 | 1,080,000 | 324,000 | 1,404,000 |
| 2010 年度 | 980,000   | 294,000 | 1,274,000 |
| 年度      |           |         |           |
| 年度      |           |         |           |
| 年度      |           |         |           |
| 総計      | 2,060,000 | 618,000 | 2,678,000 |

研究分野：建築構造

科研費の分科・細目：建築学 / 建築構造・材料

キーワード：張力空間構造、テンセグリティ、安定性、群論、ブロック対角化

## 1. 研究開始当初の背景

構造解析の計算量を低減し、本質的力学特性を解明するために、構造物の対称性は古くから利用されている。この中でも、元の行列

をからサイズの小さい子行列を抽出するための行列のブロック対角化は最も有効な手法だと考えられる。しかし、既存の手法を張力構造の安定性調査に対して適用するため

には、以下のような問題点が存在する。

- (1) 張力構造は、通常の空間構造より、その優れた力学特性によって、軽量化でき、構造性能を大幅に向上できる一方、張力管理・形状設計が容易でないため、実用化には困難点が多い。構造物の対称性を利用すれば、構造解析や安定性調査が容易になるが、数値的手法を用いる場合には特定の構造に依存するので、一般的な特性を説明することはできない。
- (2) 対称性を利用した従来の手法のほとんどは数値手法であり、行列の両側に適切な変換行列を乗じてブロック対角化するので、複雑な構造物の場合には計算量が多い。
- (3) 数値手法を用いるとき、計算機の数値計算誤差が生じてしまう。特に、高いレベルの対称性を有する構造物の剛性行列には、数多くの重複固有値が存在し、座屈解析において僅かな誤差があっても正しい座屈荷重や分岐経路が得られないか、あるいは釣合い経路解析において数値的に不安定になりやすい。

## 2. 研究の目的

ケーブルドーム、テンセグリティ構造、張弦梁、膜構造などの空間構造は張力の導入によって軽量化させると同時に耐震性能を大幅に向上させ、大空間を効率よく覆うことができる。これらの構造は体育館や公民館などに利用され、災害時の避難所として社会的に重要な存在であるが、その安定性問題は十分に解明されていない。また、意匠的にも構造的にも対称性を有する構造物は望ましい。したがって、本研究では、構造物の対称性を有効に利用し、この問題を解決することを研究目的とする。

- (1) 構造解析のための計算量を低減し、構造物の本質的特性を容易に解明できるように、対称性を持つ構造物に対して、構造解析にかかわる行列をブロック対角化するための理論を群論を用いて導き、それに基づく解析的手法を開発する。
- (2) 張力構造物の安定性調査のために、一般的な安定性条件及び無条件安定性条件を導く。
- (3) 上記の成果を、張力の設計・管理が難しい形式の張力構造の実用設計に拡張し、その構造性能向上および実用化に貢献する。

## 3. 研究の方法

- (1) 既存手法の検討：構造物の対称性を利用した解析法に関する既存の研究を検討する。
- (2) 釣合い行列のブロック対角化と軸力モードの抽出：張力構造の自己釣合いモードは釣合い行列の零空間に存在する。構造

物の自己釣合い軸力モードを解析的に抽出するために、釣合い行列のブロック対角化を定式化する。

- (3) 幾何剛性行列の(半)正定値はテンセグリティ構造の super stability の必要条件かつ十分条件の一つであるため、群の規約表現理論を用いてそれを解析的にブロック対角化する。
- (4) 適合行列のブロック対角化と微小メカニズムの抽出：微小メカニズムは構造物の潜在的な不安定の方向を示しており、適合行列の零空間に存在するため、適合行列のブロック対角化することによって微小メカニズムを抽出する。
- (5) 線形剛性行列は、釣合い行列およびその転置である適合行列を用いて、部材剛性を入れることによって、定式化できるので、上記(2)の成果を利用して、線形剛性行列をブロック対角化する。
- (6) 接線剛性行列は、線形剛性行列と幾何剛性行列の和で表すことができるため、上記(3)および(5)の成果に基づいて、接線剛性行列をブロック対角化する。
- (7) 無条件的安定性条件：幾何剛性行列の半正定値は張力構造物の張力の大きさに関係なく無条件的安定の必要条件である。この条件を利用し、その無条件的安定のための一般的な条件を誘導する。

## 4. 研究成果

- (1) 構造物の対称性を利用した解析法に関する既存の研究を検討・分類し、それぞれの理論根拠を追求し、さらにそれぞれ短所および長所を明確にした。
- (2) 群の規約表現を用いて、幾何剛性行列の独立成分である軸力密度行列のブロック対角化のための定式化を誘導した。
- (3) 釣合い行列は部材の方向余弦を成分とする行列なので、構造物の対称性によって余弦成分を再配置することによって行列の対角化を行った。
- (4) 節点の自由度に基づいた対称性と群の規約表現を利用し、幾何剛性行列のブロック対角化のための解析的手法を提案した。
- (5) 微小メカニズムは構造物の潜在的な不安定の方向を示しており、適合行列の零空間に存在する。釣合い行列と対応(転置)関係があるので、適合行列のブロック対角化の定式化を誘導した。
- (6) 線形剛性行列は釣合い行列と部材剛性行列及び適合行列の積で表現でき、そのブロック対角化は上記(3)の成果を援用できるが、行列の積計算は複雑となり、上記(4)の考え方で直接ブロック対角化した。
- (7) 接線剛性行列の正定値は構造物の安定性に最も基本的な判断条件であり、線形剛

性と幾何剛性の和で表すため、上記(4)と(6)の成果を援用し、そのブロック対角化に対して定式化した。

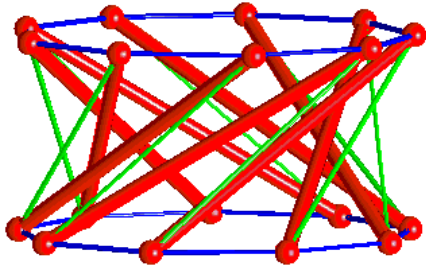


図1 二面体群対称の Prismatic 構造

- (8) 図1に示すような二面体群対称性を有する Prismatic テンセグリティ構造に対して、圧縮材の数(図2の場合には9本の圧縮材)に関係なく、上下の水平面にある節点は隣同士で接続される場合には必ず安定(super stability)となることを、上記(3)の提案式を用いて証明できた。さらに、super stableでない構造は安定となる条件を提示した。

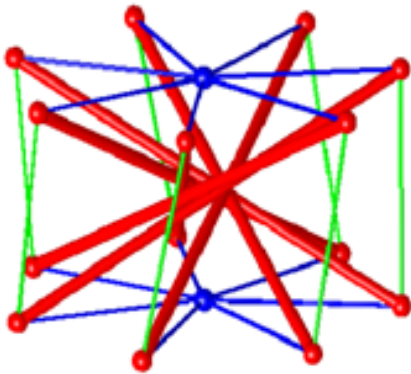


図2 二面体群対称の Star-shaped 構造

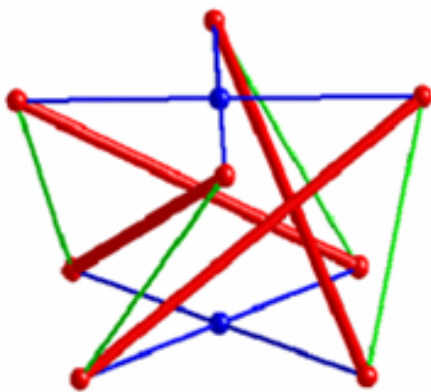


図3 Super stable でない Star-shaped 構造

- (9) 図2に示すような二面体群対称性を有する Star-shaped テンセグリティ構造に対して、構造物の複雑さ(図3の場合には7本の圧縮材)に関係なく、圧縮材の数

が奇数で、垂直ケーブルの接続関係によって圧縮材の間の距離が最小となった場合に、必ず安定(super stability)となることを、(3)の提案式で証明できた。さらに、super stableでない構造(例えば、図3に示す4本の圧縮材のある star-shaped 構造)はほかの対称性を崩した安定な釣合い形状を持つことを数値解析で追跡できた。

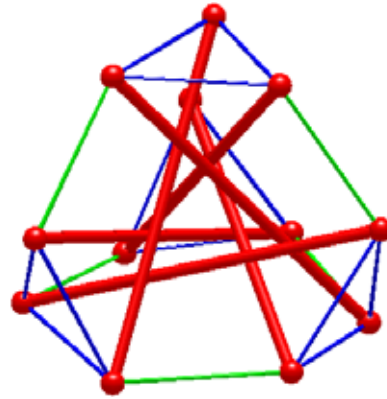


図4 四面体群対称の構造

- (10) 図4に示すような四面体群対称性を有するテンセグリティ構造に対して、その必ず安定(super stability)となる条件を軸力密度の比の範囲で解析的に導いた。

#### 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1件)

1. J.Y. Zhang, S.D. Guest, B. Connelly and M. Ohsaki, Dihedral 'star' tensegrity structures, *Int. J. Solids, Structures*, Vol. 47(1), pp. 1-9, 2010, 査読：有。

〔学会発表〕(計8件)

1. F. Tsuura, J.Y. Zhang and M. Ohsaki, Self-equilibrium and Stability of Tensegrity Structures with Polyhedral Symmetries. *Proc. International Association for Shell and Spatial Structures*, Shanghai, China, 8 Nov. 2010.
2. 津浦史幸, 張景耀, 多面体群対称性を有するテンセグリティ構造の自己釣合解析と安定性, *コロキウム構造形態の解析と創生 2010*, 2010年10月22日, 建築会館ホール(東京都)。
3. 津浦史幸, 張景耀, 四面体群対称性を有するテンセグリティ構造の自己釣合解析と安定性, *日本建築学会大会*, 2010年9月11日, 富山大学(富山県)。
4. J.Y. Zhang, M. Ohsaki and I. Ellishakoff,

- Multiobjective Hybrid  
Optimization-Antioptimization for Force  
Design of Tensegrity Structures. *Proc. 6<sup>th</sup>  
China-Japan-Korea Joint Symposium on  
Optimization of Structural and Mechanical  
Systems*, 京都大学(京都府), 22 June 2010.
5. J.Y. Zhang and M. Ohsaki, Reliability-based optimization of spatial structures using approximation model. *Proc. International Association for Shell and Spatial Structures*, Valencia, Spain, 2 Oct 2009.
  6. 張景耀, 大崎純, 二面体群対称とテンセグリティ構造の安定性, *日本建築学会大会*, 2009年8月27日, 東北学院大学(宮城県).
  7. 張景耀, 大崎純, テンセグリティ構造の位相と形状探索法, *日本建築学会近畿支部研究報告*, 2009年6月20日, 大阪工業技術専門学校(大阪府).
  8. J.Y. Zhang, M. Ohsaki, S.D. Guest and R. Connelly, Stability of tensegrity structures with dihedral symmetry. *Proc. The 9th Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures*, 名古屋国際会議場(愛知県), 9 May 2009.

〔図書〕(計0件)

〔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：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織  
(1) 研究代表者

張 景耀 (ZHANG JINGYAO)  
立命館大学・理工学部・講師  
研究者番号：50546736