

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：23903

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13865

研究課題名（和文）自由曲面シェル構造の形状決定支援ツールの開発とその応用

研究課題名（英文）Development of a shape design tool for free-form shell structures and its application

研究代表者

木村 俊明（Kimura, Toshiaki）

名古屋市立大学・大学院芸術工学研究科・講師

研究者番号：60816057

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：実際の施工過程での構造材料の物性と施工可能な曲面形状との関係を明らかにした上で、これまでに研究代表者が提案してきた構造最適化手法を用いたシェル構造物の形状決定手法を拡張した。材料特性と形状特性の間で連成を図った形状最適化手法を提案した。また、型枠システムの基本構成に必要な要素を明らかにし、支保工設置順序と曲面形状を設計変数とした同時最適化手法を提案した。これらにより設計者が建築デザイン、構造設計および施工計画まで考慮して曲面形状を決定できる設計支援システムの基礎を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

曲線状に構成される主筋の曲率を抑え、配筋施工が容易となるアーチの形状が得られることを確認した。また曲率の値の分散を最適化し、形状を構成するパターンを制御した。さらに、支保工の仮設計画に注目し、形状最適化のみならず、最適な支保工撤去順序を求める手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：A shape optimization method is extended by clarifying the relationship between the properties of the structural materials and the shape of the constructible curved surface. The shape optimization method is proposed considering both material properties and structural properties. Furthermore, a simultaneous optimization method is proposed using the order of support installation and curved surface shape as design variables. By these methods, the basis of a design support system that enables designers to design the shape of curved surfaces in consideration of architectural design, structural design, and construction planning is developed.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：シェル構造 施工計画 形状最適化 組合せ最適化 構造設計

1. 研究開始当初の背景

近年の計算機の進歩に伴い、複雑な3次元形状の表現が容易になり、構造解析や最適化などの数値計算を3D-CADと連動させることが可能となってきている。それに相まって近年では自由曲面形状の建築物の設計事例も多々見られるようになり、鉄骨ラチスシェルの登場により影を潜めたRC連続体シェル構造は再び注目されつつある。

構造最適化に基づき、力学的に理想的なシェル形状を求めることを試みた研究は数多くある。近年では最適化手法による自由曲面シェル構造の形状決定を行った設計事例も見受けられる。しかし、実際の施工過程を考慮すると、これまでの研究や設計事例には、以下のような課題が存在する。

- ・コンクリートシェル曲面の勾配は、施工中の構造材料の特性を考慮して決められていないので、配筋等の施工計画は力学的に対応されている場合が多い。また、構造最適化は力学性能の評価のみにとどまる場合が多く、施工段階の構造材料の実際の特性を考慮した曲面形状の最適化事例は殆ど見られない。

- ・3D-CADによる図面作成やNC加工などの数値制御による制作により、自由形状の型枠が実現可能となったが、自由形状を持つ型枠部材の最適設計法に関する研究は殆ど存在しない。特に、支保工位置や仮設部材の断面寸法など仮設部材の数量を決定する因子と本設する曲面形状を設計変数として採用した複合的な設計問題による曲面形状の形状最適化は殆ど見られない。

2. 研究の目的

本研究では、実際の施工過程での構造材料の物性と施工可能な曲面形状との関係を明らかにした上で、これまでに研究代表者が提案してきた構造最適化手法を用いたシェル構造物の形状決定手法を拡張する。これにより、設計者が建築デザイン、構造設計および施工計画まで考慮して曲面形状を決定できる設計支援システムを構築する。

- ・施工中の構造材料の挙動と曲面形状の関係を最適化問題の制約条件として定式化する。その後、本研究代表者が提案してきた形状決定手法を更新し、構造材料の特性と形状特性の間で連成を図った手法を提案する。

- ・既存する鉄筋コンクリートシェル構造の実設計例の型枠工法を調査し、型枠システムの基本構成に必要な要素を明らかにする。次に、支保工設置順序と曲面形状を設計変数とした最適化問題を定式化し、仮設と曲面形状の同時最適化手法を提案する。

3. 研究の方法

- ・施工中の構造材料の挙動を考慮した曲面形状の最適化法：

鉄筋の可撓性を評価するため、真直な鉄筋が曲面形状に沿って配筋された状態を考え、鉄筋の曲率を使い、配筋による鉄筋の曲げひずみエネルギーを最小化する形状最適化手法を構築する。さらに、パラメトリック曲面上の指定点における曲率を算定し、分散値を最小化させる形状最適化手法を提案する。これにより、連続体シェルの配筋・型枠パターンを制御する。

- ・本設する曲面構造と自由形状を持つ仮設部材の設計法：

初めに、既存する鉄筋コンクリートシェル構造の実設計例の型枠工法を調査し、型枠システムの基本構成に必要な要素を明らかにする。次に、支保工位置、設置順序や仮設材断面と曲面形状を設計変数とし、構造体の歪エネルギーを目的関数とした最適化問題を定式化する。

4. 研究成果

(1) 配筋施工性を考慮したRC空間構造物の形状最適化

スプライン関数の制御点座標を設計変数とし、主筋の曲げ変形によるひずみエネルギーを最小化する最適化問題を定式化した。 p -ノルムを用いて各部材の検定比を集約し、制約条件の数を削減し、許容軸力を満たす最適解を導出した。円弧アーチを対象とした数値解析例において、主筋の曲げ変形によるひずみエネルギーを最適化することにより曲率を抑え、配筋施工が容易となるアーチの形状が得られることを確認した。

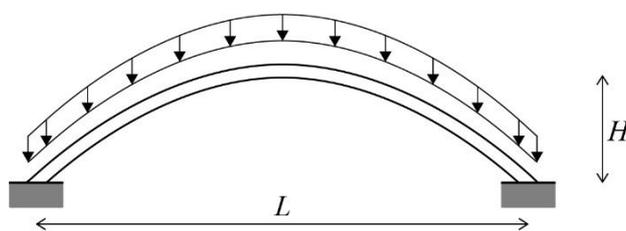


図1 円弧アーチ

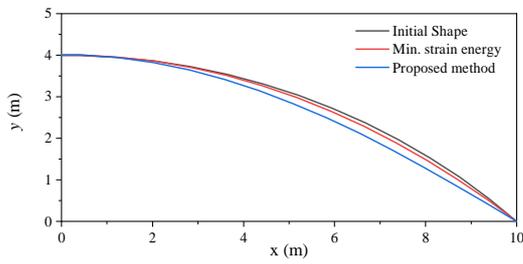


図2 最適解形状の比較（黒：初期形状，赤：既往手法，青：提案手法）

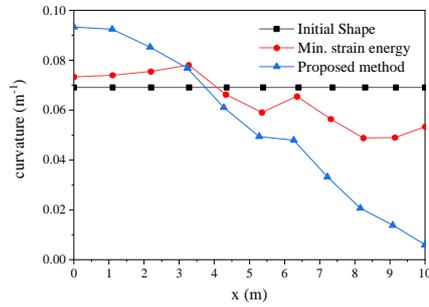


図3 曲率分布の比較（黒：初期形状，赤：既往手法，青：提案手法）

(2) 曲率分布の一様化による自由曲面シェル構造の形状最適化

微分幾何に基づき、パラメトリック曲面上の指定点における曲率を算定し、分散値を最小化させる形状最適化手法を提案した。ここでは、有効性を確認するため、鉄骨ラチスシェルを対象として、接合点における曲率の分散を最小化し、接合部種類の制御を試みた。ひずみエネルギーを最小化した曲面形状との比較を行い、曲率の分布の最適化により形状を構成するパターンが制御可能で、配筋・型枠パターンの制御へ応用可能であることを確認した。

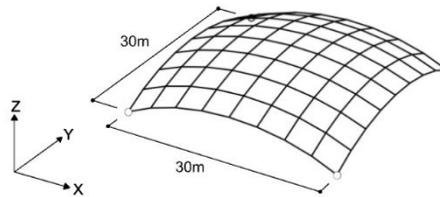


図4 検討対象モデル

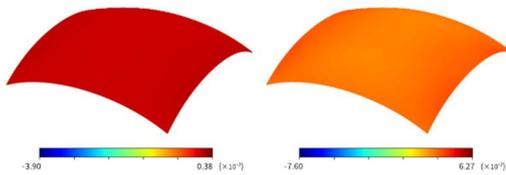


図5 提案手法による最適解の曲率分布

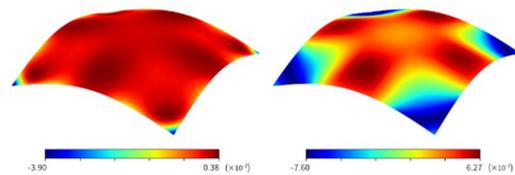


図6 既往手法による最適解の曲率分布

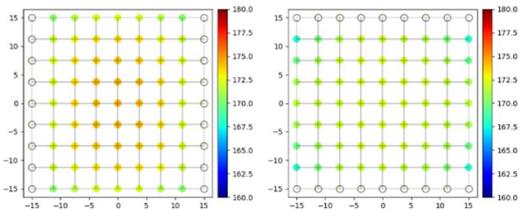


図7 接合角の分布（提案手法の最適解）

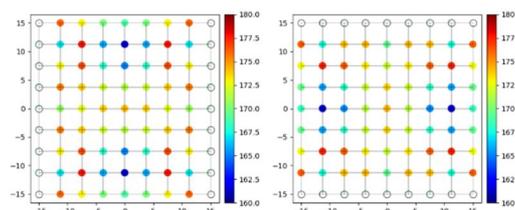


図8 接合角の分布（提案手法の最適解）

この他、形状最適化手法の構築にあたり、3D CAD の Rhinoceros とビジュアルプログラミングエディタの Grasshopper および Python を使い、曲面形状の作成・最適化環境を構築した。

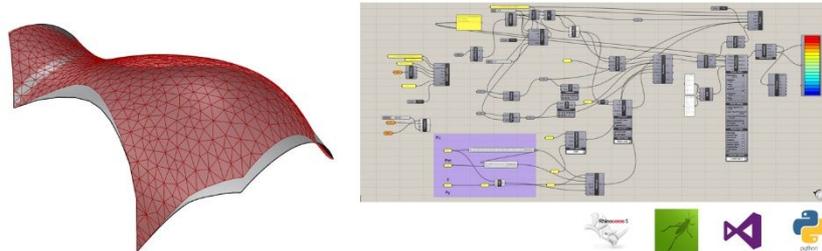


図9 Rhinoceros, Grasshopper, Fortran および Python による曲面形状ツール環境の構築

(3) 支保工撤去順序を考慮した RC アーチの構造最適化

設計事例を調査し、型枠システムの基本構成に必要な要素を明らかにした。支保工の仮設計画に注目し、RC アーチの形状最適化と最適支保工撤去順序を求める手法を提案した。提案する手法は二段階構成とした。まず、鉛直荷重時のひずみエネルギーを最小化し、その後で支保工撤去時のひずみエネルギーの総和を最小化、または支保工最大反力を最小化する支保工撤去順序を求めた。数値解析例を示し、支保工撤去順序と支保工撤去段階の力学量の推移から解の有効性を確認した。

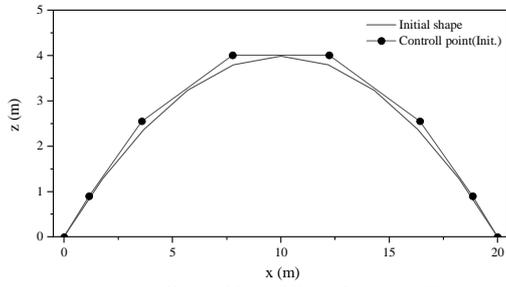


図 10 初期形状と制御点の配置

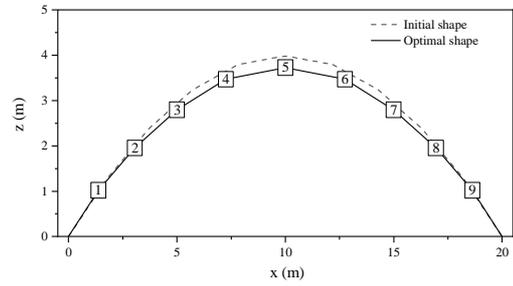


図 11 最適解の形状と支保工番号

表 1: 目的関数値と支保工撤去順序

| 解析 ケース | 目的関数 値 | 撤去順序 |
|-----------|-----------|-------------------|
| 12A | 105 Nm | 1 9 4 6 2 8 5 3 7 |
| 02A | 109 Nm | 1 9 7 3 5 4 6 2 8 |
| 12B | 18.4 kN | 5 9 8 7 6 4 2 3 1 |
| 02B | 17.8 kN | 5 9 8 7 6 3 1 4 2 |

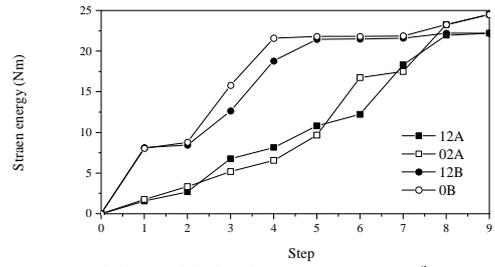


図 12 支保工撤去時におけるひずみエネルギーの推移

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 木村俊明 |
| 2. 発表標題 配筋施工性を考慮したRC空間構造物の形状最適化 |
| 3. 学会等名 情報シンポ2019 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 澄川有矢, 木村俊明, 大崎純 |
| 2. 発表標題 施工段階の制約を考慮したRCアーチの構造最適化 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|----------------------------------------|
| 1. 発表者名 竹内大貴, 木村俊明 |
| 2. 発表標題 接合部の種類を制御した自由曲面ラチスシェルの形状最適化 |
| 3. 学会等名 東海支部研究集会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|----------------------------------------|
| 1. 発表者名 竹内大貴, 木村俊明 |
| 2. 発表標題 接合部の種類を制御した自由曲面ラチスシェルの形状最適化 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 Kok Keong Choong, Mustafasanie M. Yussof, Jat Yuen Richard Liew | 4. 発行年 2019年 |
| 2. 出版社 CRC Press | 5. 総ページ数 162 |
| 3. 書名 Recent Advances in Analysis, Design and Construction of Shell & Spatial Structures in the Asia-Pacific Region | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|