

令和 3 年 5 月 17 日現在

機関番号：31302

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18888

研究課題名（和文）形状最適化アプローチに基づいたカンチレバー形式モジュール橋梁構造の設計と試作

研究課題名（英文）Design and prototype of cantilever-type module bridge based on shape optimization approach

研究代表者

中沢 正利（Nakazawa, Masatoshi）

東北学院大学・工学部・教授

研究者番号：20198063

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,600,000 円

研究成果の概要（和文）：カンチレバー形式橋梁を模した解析領域を工夫してトポロジー最適化計算を行い、フォース鉄道橋と類似性のあるX形状の卓越した最適構造を得た。

次に周期性構造の中の基本モジュールを想定した単純ばりモデルによるパラメトリック解析の結果を総合して、2つの最適形状を提案した。さらに、基本モジュール間の接合性を考慮した具体的な基本モジュールモデルを試作するため、T形ばりを基本モジュールの各構成要素とする寸法最適化解析を行い、部材軸方向に最適剛性分布を有するモデルと部材軸方向に一定剛性を有するモデルを試設計した。

最後に、両試設計モデルに対して3DCAD図面を作成し、縮小基本モジュールの試作品を製作した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

周期性構造の場合、発生する断面力および応力度分布も周期性を有するが、トポロジー最適化理論による最適構造も周期性を有するののかという学術的命題でもあった。結果として、最適形状もほぼ周期性を示すが、予想されたように異なる新しい形状も得ることができた。

基本モジュールを模した単純ばりの最適形状に関するパラメトリック解析より、単純ばりの2次元最適形状の特性が得られたことは、実橋形式との相関の観点から技術的意義が大きい。また、この結果より基本モジュールを構成する2つの基本モジュールを作成したが、これらは横方向に1/4周期ずれた形状で関連性もあることより、学術的意義も認められる。

研究成果の概要（英文）：We can get a optimum structure of X-shaped configuration analogous to Forth Railway Bridge, by carrying out the topology optimization analysis for trapezoidal region modelling the cantilever.

Next, by summarizing the results of parametric analysis for optimum shape of simply-supported beam isolated from periodic structure, we can propose two types of fundamental module. Moreover, shape optimization analysis is carried out for T-shaped elements which compose the fundamental module and is suitable for the connectivity between modules. As a results, 2 types of prototype model which have constant and variable cross section in the longitudinal beam direction can be designed. Finally, prototype of fundamental module is produced by 3D Printer.

研究分野：構造工学

キーワード：トポロジー最適化 カンチレバー橋 周期性構造 基本モジュール 寸法最適化 試作

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年の日本は、地震のみならず、ゲリラ豪雨や落雷の発生による自然災害が頻発しており、しかも日本中のどこで起こってもおかしくはない。緊急橋により、これらの自然災害から人命を救う手段を備えておくことは、予防保全の観点からも重要である。国土交通省は全国の拠点8か所に応急橋を分散配置しているが、これらの応急橋の架設には時間を要し、被災直後のライフラインとしての通路確保という迅速性は期待できない。そこで、迅速な架設が可能な緊急橋のアイデアが出てきた。

(2) 橋などの重要な社会基盤構造物を小さく折り畳んで運び、必要な場所で迅速に大きく展開して使用し、不要になれば収納して折り畳み撤去することで何度も再利用することは、日本古来の「オリガミ」に学ぶ設計思想と言える。この考え方は、自然災害を受けた構造物の緊急復旧などに対する社会資本の有効利用にも当てはめることができ、これらの緊急橋は将来の国土強靱化ビジョンにも貢献し、災害復旧時の対応として迅速な交通路の確保を実現できることが最大のメリットである。

(3) これら緊急橋を復旧現場に運搬するには、前もってサイズの小さい軽量の単位モジュールに分解できることが望ましい。現地では単位モジュールを複数組み立てて合体させることにより重要な社会基盤構造物を構築し、時には補強部材を付加して必要条件を満足させ、さらに性能を向上させることも期待できる。

2. 研究の目的

(1) カンチレバー形式橋梁について、トポロジー最適化に基づいた最適形状を模索し、実橋であるフォース鉄道橋との比較及び再評価を行なう。

(2) カンチレバー形式橋梁を同一形状の単位モジュールを横方向に連結して構成する場合のモジュール最適形状を検討し、単位モジュール化を行う。

(3) 単位モジュールの最適形状モデルを決定し、連結方法を考慮した機能的な社会基盤構造物となるよう、モジュール間の接続方法についての検討を行う。その後、単位モジュールの試設計と試作を行う。

3. 研究の方法

(1) トポロジー最適化に基づいた橋梁の最適形状を模索する。このとき、当該研究者らが独自開発した最適化プログラムおよび市販されている最適化コードを使用し比較することで、解析の信頼性を確保する。カンチレバー形式の境界条件を前提とする理由は、シザーズ構造の展開前状態を模擬した最適形状の探求が必要となるためである。このトポロジー最適化検討から、カンチレバー橋として世界的に著名なスコットランドのフォース鉄道橋と最適形状との比較あるいは再評価が可能となる。

(2) 次に、上記の最適形状をもとに、単位モジュール化を行う。この際、収納・展開機能を持たせた方がいいのか、固定式の単位モジュールが有利となるかを判断する。

(3) 単位モジュールの形状と様式が決定されれば、使用に耐えうる強固な社会基盤構造物となるよう、モジュール間の接続方法についての検討が必要となる。単位モジュールがより軽量であるほど、人力による現場移動が可能となることは大きなメリットとなる。

(4) 単位モジュールの複数接続性を確認・調整して、最終的にはカンチレバー形式モジュール橋梁構造の縮小モデルを試作する。

(5) 基本ユニットを相互に連結するだけでなく、基部にフロートをつけてポンツーン化することができれば、橋の全長は飛躍的に伸長される。もちろん、合理的な連結方法の検討や振動問題への対応などの課題はあるが、非常に将来性のあるアイデアであり、フロートも含めた橋梁モデルを試作する。

4. 研究成果

(1) カンチレバー形式梁はトポロジー最適化分野でよく知られた事例の一つであるが、その最適形状は実橋のフォース鉄道橋等とはあまり似ていない。そこで、カンチレバー形式橋梁を模した解析領域をこれまでの矩形形状から台形形状に修正し、さらにフォース鉄道橋の中間橋脚での境界条件を採用してポロジー最適化計算を行なった結果、フォース鉄道橋と類似性のあるX形

状の卓越した最適構造を得ることができた。つまり、実橋であるフォース鉄道橋も理論的最適形状の一つであることが形状最適化解析から立証された。

(2) まず、横方向に同じ構造が繰り返されるような周期性構造の最適形状について、3径間連続ばりモデルのトポロジー最適化解析(引用文献①)より検討した。その結果、作用断面力が周期性を持つ場合、最適解もある程度の周期性を有することが確認できた(引用文献②-⑦)。一方、領域の上端に支点を有する場合には、傾向の異なるトポロジー最適解、つまり3径間分の全支間にまたがる逆アーチ形状が得られているが、このような別解の存在は予想されたものであり、これも最適解の一つである。このように、解析領域のモデル化によっては傾向の異なるトポロジー最適解が得られる解析例をも示すことができた。ただし本研究では、周期性構造の最適形状も周期性を持つものとみなす。すなわち、単純ばりモデルより単位モジュールの最適形状を検討することが可能となり、研究の発展性が見込めるためである。

(3) 単純ばりモデルの最適形状は上端支点の場合には逆アーチ形状が支配的となり、一方、下端支点では方杖ラーメンあるいはアーチ形状が支配的である。また、高さ中央支点の場合には支点より下が逆アーチ形状で、支点より上が方杖ラーメンあるいはアーチ形状となる特性が得られた。

(4) 単位モジュールを想定した単純ばりに対してグランドストラクチャー法によるトポロジー最適化を適用し、解析領域の縦横比、支点位置、等分布荷重作用位置を考慮したパラメトリックな最適形状解析を実施した結果、単純ばり単位モジュールとしての最適構造を2案提案した(図-1)(引用文献⑧, ⑩, ⑭)。その一つは、Bailey 橋に類似しているとも言える。

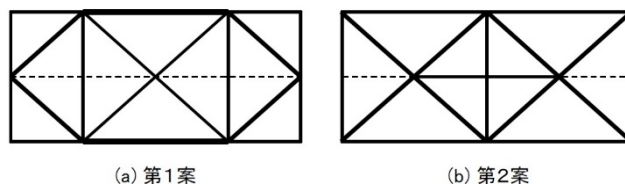


図-1 2案の二次元基本モジュール形状

(5) 基本モジュール間の接合性を考慮した具体的な基本モジュールを試作するため、T形ばりを基本モジュールの枠材、斜材、垂直材、水平材の構成要素とする寸法最適化解析を行い、部材軸方向に最適剛性分布を有するモデルを試設計した。一方、部材軸方向に変断面の場合には部材の現実的な製作が難しいため、各部材ごとに部材軸方向に一定剛性を有する一定断面モデルについても試設計した。

(6) 最後に、両試設計モデルに対して3DCAD図面(図-2, 3)を作成し、縮小基本モジュールの試作品を製作した(引用文献⑫)。

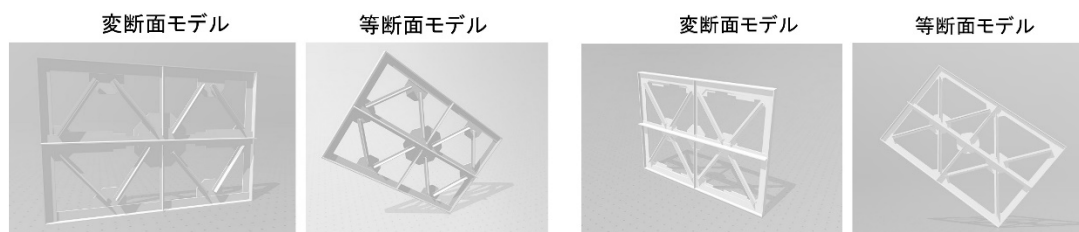


図-2 第1案の試作品(3DCAD表示)

図-3 第2案の試作品(3DCAD表示)

(7) 単位モジュールの接合と脱着を可能とする接合方法については、軍事橋であるMGBなどの実例を調査して櫛の歯形状とストレイトピンを用いた接合構造に着目した。この接合形式では、櫛の歯形状や歯の数に関する力学特性が明らかになっていないため、発生応力に関する二次元数値解析を実施して噛み合わせの歯の枚数とピン直径が最大発生応力に与える影響を調べた。次に、櫛の歯が1本の場合のピン直径と径差が継手強度に与える影響を弾塑性三次元FEM接触解析によっても検討した(引用文献⑬)。その結果、一軸引張下でのピン接合部は、ピン、ピン孔近傍、母材のいずれかが先行して降伏することによって継手強度に影響を与えるため、最適な組合せが存在すること、ピンとピン孔に隙間があると継手性能が低下すること、などが分っている。ストレイトピンを用いた接合形式の設計方法確立には追加的な数値例と更なる検討が必要である。

(8) 単位モジュールの収納・展開方法については、カンチレバー橋および単位モジュール最適形状ともに X 形状を含んでいることより部分的可動性の可能性はあるが、機構的検討およびピンジョイント強度の検討をするまでには至っておらず、将来研究のシーズ(引用文献⑩)と言える。

(9) 提案された単位モジュールの最適構造を用いた三次元単位モジュール橋の構成を検討し、さらに支点位置にフロートを付加することによるポンツーン化検討をするまでには至っておらず、この点についても将来研究のシーズとなる。この場合、水面動揺を考慮したポンツーン相互の接合方法については、柔接合を含む検討が必要である。

<引用文献>

- ① 中沢正利：架設橋のトポロジー最適化解析、平成 30 年度土木学会東北支部技術研究発表会、I-35, 2019. 3.
- ② Y.Yokotani, I.Ario, Y.Chikahiro and M.Nakazawa: Longest Scissors Type of Deployable Bridge using Topology Optimizatopn by Microtruss Model, 9th International Conference on Steel and Aluminium Structures(ICSAS19), 2019. 7.
- ③ I.Ario, Y.Yokotani, Y.Chikahiro and M.Nakazawa: Optimal Design of Large-span Bridges, 9th International Conference on Steel and Aluminium Structures(ICASA19), 2019. 7.
- ④ Y.Yokotani, I.Ario, Y.Chikahiro and M.Nakazawa: Smart Bridge Developing Based on Micro-Truss Optimization Method, IX ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials(SMART2019), 2019. 8.
- ⑤ 中沢正利・近広雄希・有尾一郎：周期性構造橋梁のトポロジー最適化解析、土木学会 2019 年度全国大会第 74 回年次学術講演会、I-11, CD 収録, 2019. 9.
- ⑥ I.Ario and M.Nakazawa: Analysis of Multiple Bifurcation Behavior for Periodic Structures, Proc. of 4th Polish Congress of Mechanics and 23rd International Conference on Computer Methods in Mechanics(PCM-CMM-2019), 2019. 11.
- ⑦ I.Ario, T.Yamashita, Y.Chikahiro. and M.Nakazawa: Finite analysis for the periodic scissors structure, Proc. of 4th Polish Congress of Mechanics and 23rd International Conference on Computer Methods in Mechanics(PCM-CMM-2019), 2019. 11.
- ⑧ 中沢正利：架設橋を構成する基本モジュールの最適構造、令和元年度土木学会東北支部技術研究発表会、I-20, 2020. 3.
- ⑨ I.Ario and M.Nakazawa: Analysis of multiple bifurcation behaviour for periodic structures, Archives of Mechanics, Vol.72, Issue 4, pp.283-306, 2020. 8.
- ⑩ 中沢正利・有尾一郎・近広雄希：パネル橋を構成する基本モジュールの最適構造について、土木学会 2020 年度全国大会 第 75 回年次学術講演会、I-257, CD 収録, 2020. 9.
- ⑪ I.Ario, T.Yamashita, Y.Chikahiro, M.Nakazawa, K.Fedor, C.Graczykowski and P.Pawlowski: Structural analysis of a scissor structure, BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES TECHNICAL SCIENCES, Vol.68, No.6, pp.1319-1332, 2020. 12.
- ⑫ 中沢正利：架設橋を構成する基本モジュール試作のための設計方法、令和 2 年度土木学会東北支部技術研究発表会、I-25, 2021. 3.
- ⑬ 小池悠・近広雄希・中沢正利・有尾一郎：一軸引張荷重を受けるモジュール橋のピン接合部の継手強度、令和 2 年度土木学会中部支部研究発表会、I-04, 2021. 3.
- ⑭ 中沢正利・近広雄希・有尾一郎：周期性構造橋梁を構成する基本モジュールとカンチレバー形式橋梁のトポロジー最適形状、土木学会構造工学論文集、Vol.67A, pp.90-98, 2021. 3.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 I.Ario and M.Nakazawa | 4. 巻 72 |
| 2. 論文標題 Analysis of multiple bifurcation behaviour for periodic structures | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Archives of Mechanics | 6. 最初と最後の頁 283-306 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.24423/aom.3433 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 I.Ario, T.Yamashita, Y.Chikahiro, M.Nakazawa, K.Fedor, C.Graczykowski and P.Pawlowski | 4. 巻 68 |
| 2. 論文標題 Structural analysis of a scissor structure | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES TECHNICAL SCIENCES | 6. 最初と最後の頁 1319-1332 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.24425/bpasts.2020.134623 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 中沢正利・近広雄希・有尾一郎 | 4. 巻 67A |
| 2. 論文標題 周期性構造橋梁を構成する基本モジュールとカンチレバー形式橋梁のトポロジー最適形状 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 土木学会構造工学論文集 | 6. 最初と最後の頁 90-98 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11532/structcivil.67A.90 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件／うち国際学会 5件）

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 中沢正利・近広雄希・有尾一郎 |
| 2. 発表標題 周期性構造橋梁のトポロジー最適化解析 |
| 3. 学会等名 土木学会2019年度全国大会 第74回年次学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Y.Yokotani, I.Ario, Y.Chikahiro and M.Nakazawa |
| 2. 発表標題 Longest Scissors Type of Deployable Bridge using Topology Optimizaton by Microtruss Model |
| 3. 学会等名 9th International Conference on Steel and Aluminium Structures(ICSAS19) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 I.Ario, Y.Yokotani, Y.Chikahiro and M.Nakazawa |
| 2. 発表標題 Optimal Design of Large-span Bridges |
| 3. 学会等名 9th International Conference on Steel and Aluminium Structures(ICSAS19) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Y.Yokotani, I.Ario, Y.Chikahiro and M.Nakazawa |
| 2. 発表標題 Smart Bridge Developing Based on Micro-Truss Optimization Method |
| 3. 学会等名 IX ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials(SMART2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Ario,I. and Nakazawa,M. |
| 2. 発表標題 Analysis of Multiple Bifurcation Behavior for Periodic Structures |
| 3. 学会等名 Proc. of 4th Polish Congress of Mechanics and 23rd International Conference on Computer Methods in Mechanics(PCM-CMM-2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|----------------------------|
| 1. 発表者名 中沢 正利 |
| 2. 発表標題 架設橋のトポロジー最適化解 |
| 3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 I.Ario, T.Yamashita, Y.Chikahiro. and M.Nakazawa |
| 2. 発表標題 Finite analysis for the periodic scissors structure |
| 3. 学会等名 Proc. of 4th Polish Congress of Mechanics and 23rd International Conference on Computer Methods in Mechanics(PCM-CMM-2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 中沢正利 |
| 2. 発表標題 架設橋を構成する基本モジュールの最適構造 |
| 3. 学会等名 令和元年度土木学会東北支部技術研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 中沢正利・有尾一郎・近広雄希 |
| 2. 発表標題 パネル橋を構成する基本モジュールの最適構造について |
| 3. 学会等名 土木学会2020年度全国大会第75回年次学術講演会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 中沢正利 |
| 2. 発表標題 架設橋を構成する基本モジュール試作のための設計方法 |
| 3. 学会等名 令和2年度土木学会東北支部技術研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小池悠・近広雄希・中沢正利・有尾一郎 |
| 2. 発表標題 一軸引張荷重を受けるモジュール橋のピン接合部の継手強度 |
| 3. 学会等名 令和2年度土木学会中部支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔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 |
|-------|---|--|----|
| 研究分担者 | 近広 雄希 (Chikahiro Yuki) (10778905) | 信州大学・学術研究院工学系・助教 (13601) | |
| 研究分担者 | 有尾 一郎 (Ario Ichiro) (50249827) | 広島大学・先進理工系科学研究科(工)・助教 (15401) | |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|