

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420545

研究課題名(和文) 双対性の視点に基づく建築構造物の非線形挙動に対するロバスト設計法

研究課題名(英文) Robust design of structures considering nonlinear responses from the perspective of duality principle

研究代表者

寒野 善博 (Kanno, Yoshihiro)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号：10378812

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、構造物のロバスト性の評価とロバスト最適設計法について、多様な角度から研究を行った。特に、最適化の理論の中心をなす双対性の概念を用いることで、従来は扱うことが困難であった構造物の形状の不確実性に対するロバスト最適設計法を開発した。また、弾性問題に限らず、種々の弾塑性問題における不確実性・ロバスト性を取り扱う手法を開発した。さらに、これらのロバスト最適設計法の基礎をなす理論として、組合せ的な性質をともなう最適設計問題に対する新しい定式化を提案した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we have studied various aspects of robustness evaluation as well as robust optimal design of structures. Particularly, by making use of the concept of duality which plays a significant role in optimization theory, we have developed a robust optimization method of structures possessing uncertainty in its configuration. It was difficult to deal with this sort of uncertainty by the existing methods. Also, besides problems in elasticity, we have developed methods dealing with uncertainty and robustness issues in various elastoplastic problems. Furthermore, as fundamentals for the robust design optimization methods developed in this project, we have presented a couple of new formulations for design optimization problems possessing combinatorial properties.

研究分野：応用力学，数理工学，構造工学

キーワード：ロバスト性 冗長性 相補性 半正定値計画 混合整数計画 ロバスト最適化

1. 研究開始当初の背景

本研究課題の主題である「構造物のロバスト性」は、さまざまな分野の工学における設計問題に共通する課題として古くから認識されていた。しかし、ロバスト性の評価法やロバスト性を保証した最適設計法には、通常の（つまり、不確かさを考慮しない）応答評価法や最適設計法にはない困難さが存在する。それは、ロバスト性の評価は構造物にとっての最悪シナリオと密接な関係をもつが、最悪シナリオ自体を求めるために（最適設計とは別の）最適化問題を解く必要があることに起因する。最悪シナリオを求めるための最適化問題は、従来の取り扱い方では、微小変形弾性などの強い仮定を設けない限り、大域的には解けないという困難さがある。また、ロバスト最適設計法は、その構成要素である目的関数や制約関数に最悪シナリオにまつわる最適化問題を内包するという、いわば入れ子の構造をもつ最適化問題であり、こちらも強い仮定を設けなければ効率的に解くことは困難であった。これらを受けて、まずは弱い非線形性を有する系に対するロバスト性の評価法やロバスト最適設計法を開発することが望まれているのが、研究開始当初の状況であった。

2. 研究の目的

「研究開始当初の背景」にも記述したように、ロバスト性は最悪シナリオと密接な関係をもち、最悪シナリオを求める問題は一種の最適化問題として定式化できる。この研究課題では、この関係性に注目し、最適化の理論の中核をなす双対性の視点を導入することで、既往の手法では扱いが困難であった（あるいは、近似的にしか扱えなかった）さまざまな非線形問題にまつわる不確か性を扱える諸手法を開発することを課題申請時の目的としていた。また、ロバスト性ととも設計では重要視される構造物の冗長性という概念にも着目し、冗長性を確保する条件の下での最適設計問題に対する解法を開発することも目的としていた。

3. 研究の方法

この研究課題では、複数のアプローチをとることにより、主題にまつわるさまざまなタイプの問題を解決してゆく方法をとった。実際には、それらのアプローチが有機的に組み合わさることによって既往の困難点が解決された。

一つ目は、双対性の視点から生まれる、ロバスト性の安全側での取り扱いである。最大・最小定理の意味での双対性は最大化問題の上界を得るために有用であるが、最悪シナリオの文脈では双対性

により最悪応答（極限応答）の安全側の評価が得られる。これを利用することで、ロバスト性の安全側での簡易な評価法とロバスト最適化の安全側での近似解を得る手法を開発する。

双対性にしばしば伴って現れる概念に、相補性がある。相補性は、通常は連続変数に対して定式化されるが、離散変数を導入することで同じ条件を記述することもできる。そこで、離散変数を含んだ定式化を活用することで、これまでは扱いが困難であった最適設計問題を解きやすい形に帰着することが研究の方針として考えられる。

4. 研究成果

まず、トラスの形状の不確か性を考慮したロバスト最適設計問題に対して、最悪シナリオ問題に対する双対性を利用することで、安全側の近似解を得る効率のよい手法を開発することができた。また、同様の視点を極限解析に適用することで、部材の消失に対する冗長性を考慮したトラスの最適設計手法を開発した。次に、トラスの通常最適設計法では、しばしば極めて細い部材が生じる。このような部材は、種々の振動に対してロバスト性が低い。このような解を回避するため、部材断面の種類数を限定するという新しい定式化を提案した。その後、この定式化は、骨組構造の離散最適化に応用展開できることに気づき、その方向でも新たな定式化と従来よりも高速な解法を得ることができた。

次に、弾塑性問題にまつわる不確か性として、まず、シェイクダウン解析をとりあげた。この問題は、簡単に言えば、弾塑性構造物がどのくらいまで大きな外力のばらつきに抵抗できるかを求める問題であり、ロバスト性ともつながりが深い。この問題に対して、これまで扱われてこなかったより一般的な仮定の下で、双対性の視点をを用いると効率のよい解法が得られることを明らかにした。また、この成果から派生して、弾塑性増分問題に対する高速で実装の簡単な数値解法を得ることもできた。

さらに、建築構造力学におけるより具体的な問題として、断層近傍で地震動を受ける弾塑性建築構造物のロバスト性評価法を構築した。弾塑性構造物に対してこのような評価を行うことは一般には難しいが、断層近傍での構造物の極限応答については（不確か性を考慮しない場合について）閉形解が得られていた。この解を利用することで、種々のパラメーターのばらつきに対するロバスト性を定量的に評価する手法を開発することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 14 件)

- [1] K. Fujita, K. Yasuda, Y. Kanno, I. Takewaki: Robustness evaluation of elastic-plastic base-isolated high-rise buildings under critical double impulse. *Frontiers in Built Environment (Specialty Section: Earthquake Engineering)*, 3, Article No. 31 (2017). DOI: 10.3389/fbuil.2017.00031
- [2] Y. Kanno, H. Yamada: A note on truss topology optimization under self-weight load: Mixed-integer second-order cone programming approach. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 56, 221-226 (2017). DOI: 10.1007/s00158-017-1657-9
- [3] Y. Kanno: A note on formulations of static shakedown analysis with bounded kinematic hardening. *Mechanics Research Communications*, 74, 57-59 (2016). DOI: 10.1016/j.mechrescom.2016.04.005
- [4] Y. Kanno, I. Takewaki: Robustness analysis of elastoplastic structure subjected to double impulse. *Journal of Sound and Vibration*, 383, 309-323 (2016). DOI: 10.1016/j.jsv.2016.07.023
- [5] Y. Kanno: A fast first-order optimization approach to elastoplastic analysis of skeletal structures. *Optimization and Engineering*, 17, 861-896 (2016). DOI: 10.1007/s11081-016-9326-1
- [6] Y. Kanno: Redundancy optimization of finite-dimensional structures: Concept and derivative-free algorithm. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 143, Article No. 04016151 (2017). DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001630
- [7] Y. Kanno, K. Yasuda, K. Fujita, I. Takewaki: Robustness of SDOF elastoplastic structure subjected to double-impulse input under simultaneous uncertainties of yield deformation and stiffness. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 91, 151-162 (2017). DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2017.02.013
- [8] Y. Kanno: A note on formulations of robust compliance optimization under uncertain loads. *日本建築学会構造系論文集*, 80 (No. 710), 601-607 (2015). DOI: 10.3130/aijs.80.601
- [9] T. Yamaguchi, Y. Kanno: Ellipsoidal load-domain shakedown analysis with von Mises yield criterion: A robust optimization approach. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 107, 1136-1144 (2016). DOI:

10.1002/nme.5206

- [10] Y. Kanno: Mixed-integer second-order cone programming for global optimization of compliance of frame structure with discrete design variables. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 54, 301-316 (2016). DOI: 10.1007/s00158-016-1406-5
- [11] S. Yamada, Y. Kanno: Relaxation approach to topology optimization of frame structure under frequency constraint. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 53, 731-744 (2016). DOI: 10.1007/s00158-015-1353-6
- [12] Y. Kanno: Global optimization of trusses with constraints on number of different cross-sections: A mixed-integer second-order cone programming approach. *Computational Optimization and Applications*, 63, 203-236 (2016). DOI: 10.1007/s10589-015-9766-0
- [13] D. Hashimoto, Y. Kanno: A semidefinite programming approach to robust truss topology optimization under uncertainty in locations of nodes. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 51, 439-461 (2015). DOI: 10.1007/s00158-014-1146-3
- [14] M. Hirota, Y. Kanno: Optimal design of periodic frame structures with negative thermal expansion via mixed integer programming. *Optimization and Engineering*, 16, 767-809 (2015). DOI: 10.1007/s11081-015-9276-z
- 〔学会発表〕 (計 17 件)
- [1] 寒野 善博: DC アルゴリズムを用いたトラス構造のロバスト最適設計法. 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会, 2018.
- [2] 星野 耀, 藤田 慎之輔, 寒野 善博: 柱の消失を考慮した骨組構造の部材断面の最適設計. 2017 年度日本建築学会大会学術講演会, 2017.
- [3] 星野 耀, 藤田 慎之輔, 寒野 善博: 柱の消失を考慮した平面骨組の部材断面最適化. 第 64 回理論応用力学講演会, 2017.
- [4] 寒野 善博, 山田 裕通: 混合整数 2 次錐計画による自重を考慮したトラス構造の位相最適化手法. 2017 年度日本建築学会大会学術講演会, 2017.
- [5] Y. Kanno: Robust truss topology optimization under uncertain loads by using penalty concave-convex procedure. *The 12th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO12)*, 2017.

[6] 寒野 善博: 大規模トラスの弾塑性解析に対する加速近接勾配法. 第 12 回最適化シンポジウム (OPTIS 2016), 2016.

[7] T. Yamaguchi, Y. Kanno: A semidefinite programming approach to static shakedown analysis with von Mises yield criterion and ellipsoidal load domain. Emerging Trends in Applied Mathematics and Mechanics (ETAMM 2016), 2016.

[8] Y. Kanno: Redundancy optimization of trusses against uncertainty in structural damage. EUROMECH Colloquium 584, Multi-Uncertainty and Multi-Scale Methods and Related Applications, 2016.

[9] Y. Kanno: Accelerated proximal gradient method for equilibrium analysis of elastoplastic spatial truss structures. IASS Annual Symposium: Spatial Structures in the 21st Century, 2016.

[10] Y. Kanno: Mixed-integer programming approaches to topology optimization of finite-dimensional structures. The Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2016 (ACSMO 2016), 2016.

[11] 寒野 善博: 混合整数 2 次錐計画を用いたトラス構造の最適設計法. 第 27 回 RAMP シンポジウム, 2015.

[12] Y. Kanno: Design of periodic frame structures with negative thermal expansion via mixed integer programming. The 3rd International Workshops on Advances in Computational Mechanics (IWACOM III), 2015.

[13] Y. Kanno: On multiplicity of eigenvalues in robust compliance optimization under uncertain loads. The 3rd International Conference on Materials and Reliability (ICMR-2015), 2015.

[14] Y. Kanno: Truss topology optimization under constraints on number of different design variables. The 11th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO11), 2015.

[15] D. Hashimoto, Y. Kanno: Robust truss topology optimization under geometric uncertainties via semidefinite programming. The 8th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems (CJK-OSM8), 2014.

[16] 橋本 大樹, 寒野 善博: 幾何学的な不確実性を考慮したトラスのロバスト最適設計法. 第 63 回理論応用力学講演会, 2014.

[17] 寒野 善博: 混合整数 2 次錐計画を用いたトラスの離散最適化法. 第 11 回最適化シンポジウム (OPTIS 2014), 2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寒野 善博 (KANNO, Yoshihiro)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号: 10378812