

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656285

研究課題名(和文)降伏した材料の塑性挙動に対する最適制御

研究課題名(英文)Optimal control of plastic material deformation

研究代表者

京谷 孝史 (Takashi, Kyoya)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00186347

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、構造のエネルギー吸収性能を向上させるために、異なる2つの材料を組み合わせるといふ新しい数理的手法の開発に着手した。これらの準備をした上で、構造の最適材料配置を扱う問題としてトポロジー最適化を実施した。「高精度の感度導出法」については、既往の研究成果をもとにそれらの問題点を抽出し、改善策を提案しつつも我々独自の新しい発想で、その理論を構築した結果、高精度感度の導出に成功した。この手法は、今後の塑性変形の発生を前提とした設計を実施する上で、非常に有効な手法である。これらの成果は、4つの学術論文(2つは掲載済み、2つは査読審査中)ならびに国内外の学会で積極的に発表された。

研究成果の概要(英文)：In the present study, we developed topology optimization of composite structure to maximize the energy absorption capacity in terms of two different materials. The most significant point in the present study is the derivation of accurate sensitivity of the objective function with respect to the design variable.

We proposed the new approach capable of providing a highly accurate sensitivity by investigating the theoretical problems on other previous studies. The present method is considered as very efficient approach/method for the advance material design. The achievement is shown the two publication submitted to academic journal and six international/national congresses.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学，地震工学，維持管理工学

キーワード：応用力学 構造最適化 トポロジー 制震 シミュレーション工学

1. 研究開始当初の背景

金属やコンクリートをはじめとする建設材料の破壊メカニズムは、概ね解明されているといえる。ところが、「材料の破壊、或いは破壊後の挙動を思い通りにコントロールできるか」という問いに対しては、「不可能である」と言わざるを得ない。本研究は、エンジニアのこれまでの経験的手法に頼らない構造最適化手法という数学的アプローチを用いてそれを可能にする挑戦的研究である。

2. 研究の目的

近年、(極)低降伏点鋼ダンパーという、低降伏点鋼材の塑性変形性能を利用した制震架構により、構造物にかかる地震エネルギーを吸収しようとする流れがある。しかし、低降伏点鋼は低強度高延性材料であるため、強度や耐荷力を期待することはできない。そのため、延性と強度の両方、すなわちエネルギー吸収性能を向上させることが望まれるが、これまでの経験的手法では、塑性化領域にある複雑な材料挙動を思い通りに制御することは不可能である。

本研究は、この問題に挑戦するもので、構造最適化手法という数理的アプローチにより、低降伏点鋼制震ダンパーの材料降伏後の挙動をコントロールし、そのエネルギー吸収性能を最大化する全く新しい独自の手法の確立を目的とするものである。

3. 研究の方法

概要: 当該研究のような経路依存型の最適化問題には、勾配法による最適化アルゴリズムが不可欠となる。そして、その最適化計算の中で最も難解かつ計算量が多いのが感度解析と言われるものである。ここでいう感度とは、ある設計変数(本研究では材料密度)を微小変化させた時にどれだけ目的関数(エネルギー吸収性能)が変化するか、すなわち、目的関数の設計変数に対する微分をいう。

勾配法による最適化アルゴリズムは、その感度の大小に基づいて解を順次最適解へ近づけるものであり、その感度の誤差が大きければ、物理的に意味のない、信頼性の乏しい解に収束するという性質をもつ。そのため、最適化問題では、いかに高精度の感度を導出できるかが信頼性のある最適解を得る鍵となる。これまでの構造最適化の研究報告のうち、この問題を解決する方法は見出されていない。本研究では誤差が生じるメカニズムを明らかにし、その誤差をなくする方法を提案することで、高精度の感度を得るようにした。以下に、各年度の研究方法を記す。

まず、初年度は繰返し載荷を考慮した高精度な感度の導出法の確立に徹した。ここでは、感度の誤差が発生するメカニズムを明らかにするために、まずは弾性体を対象としたトポロジー最適化のプログラムを作成した。構

造は、パイロット的に単純な片持ち梁から始めた。基本となるプログラムは、CCARAT という、申請者らがこれまで FEM と構造最適化の研究で使用・作成してきたものである。本研究では、まず感度の高精度化に重点を置き、差分による誤差を含まない解析的勾配法という感度解析手法を用いた。ここでは、デバッグソフトも併用しながら、作成するプログラムの正誤を厳しくチェックした。

次のステップは、材料モデルを弾塑性モデルに拡張し、同様な方法で感度誤差の発生するメカニズムを検証した。これら一連の作業は、京谷・加藤が協働して行った。具体的には、京谷が極限解析で培った最適化理論に関する豊富な知識を活かしてそのアルゴリズムを明確にし、加藤が構造最適化問題に関する豊富な経験をもとにそれをプログラムに実装した。

H24 年度は前年度の成果を用いて大規模計算を実施するための準備をおこなった。数値解析は、FEM プリ・ポストプロセッサ(GID)を利用して、入力データを作成した。当該計算では、数値計算量の多さから 2 次元平面解析とした。構造モデルは、繰返し載荷のせん断試験を想定して行った。ここでは、2 種類の鋼材として、高強度炭素鋼(高強度低延性)と低降伏点鋼(低強度高延性)を用い、エネルギー吸収性能最大化を意図したトポロジー最適化を行った。エネルギー吸収性能は、その荷重-変位曲線が囲む面積として定義した。

なお、最適化問題 1 ケースの解析時間は、1 か月単位となった。解析の途中で停電などによる予期せぬトラブルに見舞われることも想定されたため、本研究では、そのような状態に見舞われても、現時点の計算の 1 つ前の最適化ステップのデータを保存するようにプログラミングし、計算機が停まった後でもそこから最適計算を再開することが可能なように準備した。

H25 年度は、これまでの準備を踏まえて大規模構造最適化の計算を実施した。

4. 研究成果

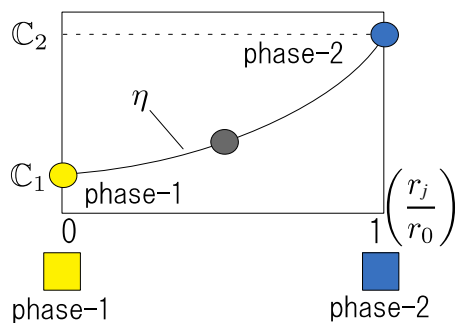
本研究では、構造のエネルギー吸収性能を向上させるために、異なる 2 つの材料を組み合わせるといった新しい数理的手法の開発に着手した。これらの準備をした上で、構造の最適材料配置を扱う問題としてトポロジー最適化を実施した。

本研究では主に以下の 3 つの成果を得た。

(1) 単一材料を対象とした弾塑性モデルを複合材料へ拡張する正則化法の提案

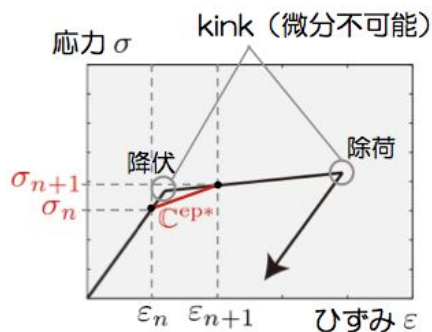
本研究では、von Mises の降伏関数および等方性硬化則で定義された弾塑性材料モデルを用いた。この材料モデルにはヤング係数および硬化係数、初期応力の 3 つの材料パラメータが存在する。本研究ではその材料モデルを複合材料に適用できるように 2 相の材料

間の材料パラメータを内挿する、いわゆる正則化の提案を行った。具体的には、SIMP法と同等の多孔質材料を想定した材料モデルを複合材料に拡張したものである。以下の図は正則化の概念であり、ここでは2相のヤング係数がベキ関数を用いて正則化した様子を示す概念図である。この手法の特徴は、従来型の材料モデルとほぼ同じような取り扱いで、複合材料のトポロジー最適化問題に適用できることである。これにより、2相の材料の各々の特性を活かした材料設計が可能になった。



(2) 感度の高精度化の実現

前述のとおり、本研究で最も重要な成果は高精度の感度の導出である。本研究で用いる最適化手法は目的関数の設計変数に対する勾配を求め、その情報をもとに最適構造へ更新していくという、広く用いられる方法である。そのため、設計変数に対する勾配、すなわち、感度を高精度で導出することが重要である。しかし、弾塑性材料の場合、応力-ひずみ曲線は下図のように折れ点、すなわち、微分不可能が存在するため、この近傍で正しい感度を導出することは困難であるといえる。

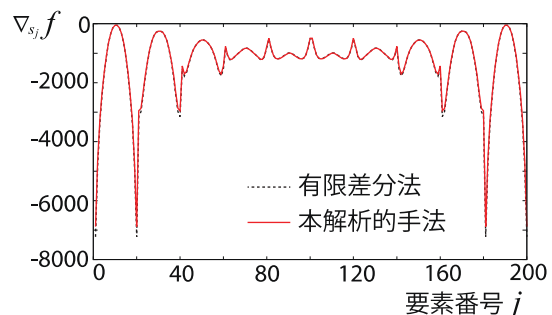
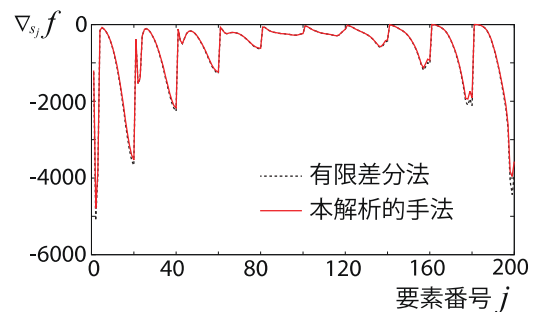
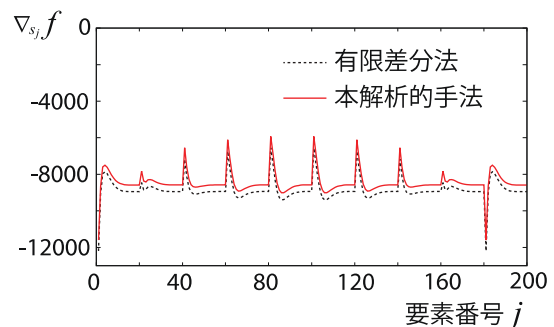


これまで、この問題を解決するために様々な研究開発が行われてきた。Maute (1998), Schwarz ら (2001)らの研究はその代表であると考えられるが、いずれも高精度の感度を導出することができなかった。本研究では、この問題の解決に正面から向き合い、「力のつり合い式を満たす応力を直接微分する方法」による感度の導出法を提案した。以下の3つの図はその精度を示すもので、様々な構造を用いて精度の検証を実施したものである。ちなみに、これらの図は上から

順に、引張り変形、せん断変形、曲げ変形を加えた場合の感度を示している。ここで、図の赤線が本研究で提案した方法によって得られた感度、破線がその真値として有限差分法によって別途計算された感度である。つまりこの有限差分法の結果と近ければ高精度の感度が導出できたものといえる。

これらの3つの図をみる限り、提案手法と有限差分法の感度はほぼ一致している。これは、提案した感度の導出法が極めて高精度なものであることを示唆している。

これらの結果から、本研究では複合材料の弾塑性挙動を精度よく考慮できる感度の導出に成功したといえる。これにより、弾塑性材料を扱う最適設計に大きく貢献するものであるといえる。



(3) 大規模最適化数値計算例

ここでは、前項において感度の高精度化が検証されたため、提案手法によって構造を最適化した事例を示す。

まずは、参考として単一材料を用いた場合の最適化例を示している。図-1左は弾性変形下で構造の剛性最大化した場合、同図右は塑性変形を考慮し、エネルギー吸収性を最大化した場合のトポロジーである。両者を比べると概ね同じトポロジーが得られており、これは

剛性最大化で求めたトポロジーで設計すれば、概ねエネルギー吸収性能も確保できる構造になるということを示唆している。これは、単一材料を用いた設計においては有効な結果であるといえる。

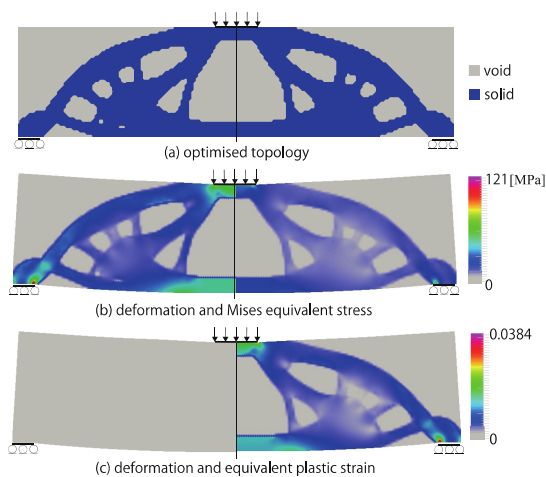


図-1 単一材料を用いた場合のトポロジー最適化結果，(左)弾性変形下，(右)塑性変形下

一方、複合材料については、図-2 に示すような異なる2種類の塑性材料で構成された条件下で最適化を行った。材料1は低降伏点鋼、材料2は高強度鋼である超々ジュラルミンを想定している。図-3, 4 はそれぞれ引張り変形、せん断変形を与えた場合の最適下構造である。ここでも、念のため弾性変形レベル(図左側)と塑性変形レベル(同図右側)でエネルギー吸収性能最大化を行った。これより、弾性変形レベルでは、初期剛性の大きい材料1が構造の支配的な役割を果たし、塑性変形レベルでは逆に強度の高い材料2が支配的な役割を果たす、力学的に合理的なトポロジーが得られた。

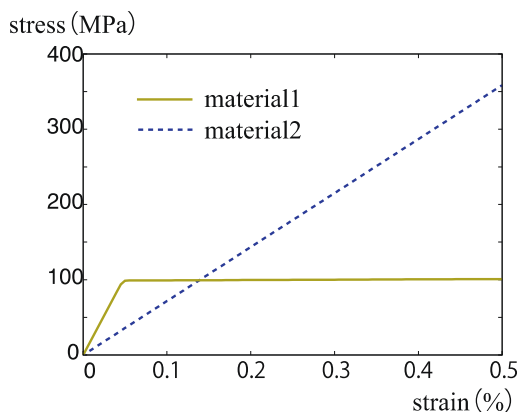


図-2 複合材料を構成する異なる2つの材料の応力-ひずみ関係，(材料1)弾性変形下，(右)塑性変形下

これは、各々の材料特性を効果的に活用できる最適化手法であるとともに、材料の経路依存性を考慮できるものであることを意味している。

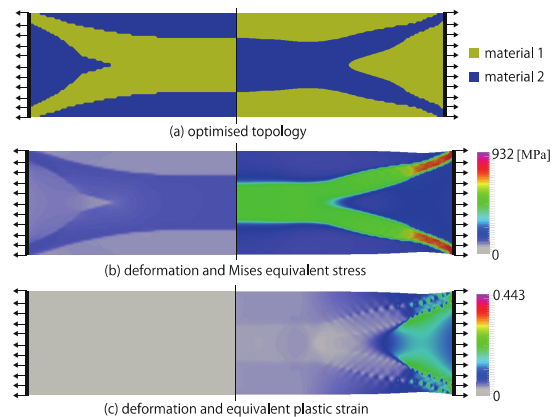


図-3 引張り変形下の最適化トポロジー (左)弾性変形下，(右)塑性変形下

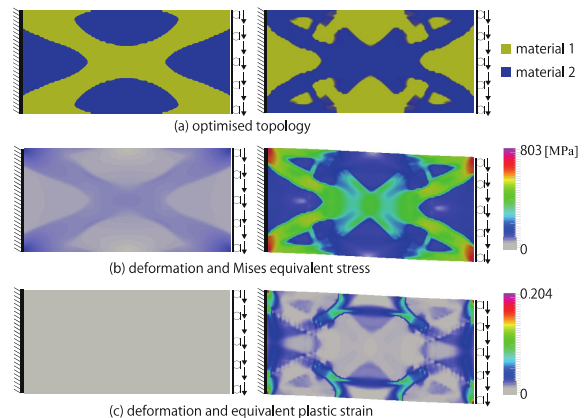


図-4 せん断変形下の最適化トポロジー (左)弾性変形下，(右)塑性変形下

以上をまとめると、本研究では「高精度の感度導出法」について、既往の研究成果をもとにそれらの問題点を抽出し、改善策を提案しつつも我々独自の新しい発想で、その理論を構築した。その結果、高精度感度の導出に成功し、また数値計算例では本手法により塑性変形下における複合材料の最適構造を得ることができた。

この手法は、ダンパー等の塑性変形の発生を前提とした設計を実施する上で、非常に有効な手法であるといえる。これらの成果は、4つの学術論文(2つは掲載済み、2つは査読審査中)ならびに国内外の学会で積極的に発表された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

1. 加藤準治, Ramm Ekkehard, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 繊維複合材料のひずみ軟化を

考慮した多層材料最適化手法の提案, 土木学会論文集 A2, 67(1), pp. 39-53, 2011 (査読有).

2. 加藤準治, Ramm Ekkehard, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 損傷を受ける繊維複合材料の繊維形状最適化, 土木学会論文集 A2, 67(1), pp. 54-68, 2011 (査読有).

[学会発表](計 7 件)

1. Junji Kato, Hiroya Hoshiha, Shinsuke Takase, Kenjiro Terada, Takashi Kyoya, Topological Design Considering Elastoplastic Behavior for Structural Toughness, 'Proc. of 1st Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problem (COMPSAFE2014)', pp. 66-69, Sendai, Japan, Apr. 13, 2014.
2. 干場大也, 加藤準治, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 複合材料の塑性挙動を考慮したトポロジー最適化の実装, 土木学会東北支部技術研究発表会, 3月8日, 八戸 (全2頁), 2014.
3. 加藤準治, 谷地大舜, 寺田賢二郎, 高瀬慎介, 京谷孝史, マルチスケールトポロジー最適化を用いた材料設計, 日本機会学会 第26回計算力学講演会(CMD2013), 佐賀 (全2頁), 10月2日, 2013.
4. Junji Kato, Kenjiro Terada, Takashi Kyoya, Topology optimization of microstructures for inelastic composite materials applying decoupling multi-scale analysis, the 6th European congress on computational methods in applied sciences and engineering (ECCOMAS 2012), Sep. 12, Wien, Austria, (1page), 2012: *keynote lecture*.
5. 加藤準治, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 分離型マルチスケール解析法によるミクロ

構造トポロジー最適化の提案, 第17回日本計算工学会講演会, 京都 (全4頁), 6月30日, 2012.

6. 加藤準治, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 損傷モデルを考慮した繊維複合材料のエネルギー吸収性能最大化, 第16回日本計算工学会講演会, 東京 (全4頁), 6月20日, 2011.
7. Junji Kato, Ekkehard Ramm, Material Layout Optimization for Fiber Reinforced Composites considering Material Nonlinearity, 'Proc. of 9th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization WCSMO09', Shizuoka, Japan (10 pages), May 15, 2011.

[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

京谷 孝史 (KYOYA, TAKASHI)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00186347

(2) 研究分担者

加藤 準治 (KATO, JUNJI)
東北大学・災害科学国際研究所・助教
研究者番号: 00594087

寺田 賢二郎 (TERADA, KENJIRO)
東北大学・災害科学国際研究所・教授
研究者番号： 40282678

(3)連携研究者
(なし)