

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 1 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360248

研究課題名(和文)高性能有限要素解析による免制震デバイス最適化のための数値実験システム

研究課題名(英文) Numerical Experiment System for Optimization of Isolation and Control Devices using High-Performance Finite Element Analysis

研究代表者

大崎 純(Ohsaki, Makoto)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40176855

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円、(間接経費) 4,140,000円

研究成果の概要(和文)：建築骨組の免震・制振デバイスの性能最適化のための数値実験システムの要素技術を開発した。本システムは、鋼材料の繰返し載荷特性をモデル化するための構成則とパラメータ同定法、少ない解析回数で精度の保証された近似最適解を得ることができる確率的手法、骨組のパラメータと応答値の現実的な上・下限値を求めるための確率的手法で構成される。

制振デバイスの例として、せん断パネルダンパーの形状を最適化し、塑性エネルギー消費能力や変形能力を大きく向上できることを示した。また、免震骨組の地震応答解析を実施し、支承の地震時の局所応答を、詳細に検討可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Components of numerical experiment system have been developed for optimization of passive control and isolation devices. This system consists of a constitutive model and its identification method of steel material under cyclic deformation, a probabilistic approach for obtaining accurate approximate optimal solutions within small number of analyses, and a probabilistic method for estimating bounds of parameters and responses of building frames. It has been shown that the energy dissipation and deformation capacities can be improved by optimizing the shape of shear panel damper. Furthermore, it has been shown in the analysis of base-isolated building that the local responses of the rubber bearings can be evaluated in detail using a high-performance finite element analysis.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学，建築構造・材料

キーワード：有限要素解析 最適化 免制震デバイス 弾塑性応答

1. 研究開始当初の背景

鋼構造物の耐震性能向上を目的として、近年さまざまな部材（ブレース）、接合部、免震・制振装置、構法が開発されている。それらの設計やパラメータチューニングにおいて、応答特性の概要を単純モデルで予測し、コンポーネントの物理実験で性能を確認するのが一般的である。

しかし、物理実験には多くの時間と費用を必要とするため、鋼材料の降伏応力のばらつきや残留応力の影響などを考慮したパラメトリックな検討ができない。また、部材やヒンジモデルを作成する際に、種々の荷重パターンを考慮してパラメータを同定できない。さらに、鋼材料の繰返し荷重において、物理実験の結果が予測と大きく異なる場合がある。

このような背景のもとで、新しい制振デバイスを開発する際に、高精度で予備解析とパラメータチューニング（最適化）を実行可能なモデルと解析手法が必要とされる。そのために、建築分野で使用される鋼材の特性をモデル化するための構成則、有限要素解析モデルと、さまざまなパラメータのばらつきを考慮した最適化手法の開発が望まれる。

2. 研究の目的

- (1) 免震あるいは制振デバイスを有する骨組構造物の地震応答を、ソリッドモデルを用いた有限要素解析によって精度よく予測できることを示す。
- (2) 建築構造物で使用される鋼材料の繰返し荷重特性をモデル化するための区分線形複合硬化則を提案し、そのパラメータを単軸材料試験の結果から同定するための最適化手法を開発する。
- (3) 解析のために多くの計算時間を有する構造最適化問題を対象として、少ない解析回数で精度の保証された近似最適解を得ることができるランダム化アルゴリズムを提案する。
- (4) パッシブ制振デバイスの種々のパラメータを最適化し、塑性エネルギー消費能力や変形能力を大きく向上できることを示す。
- (5) 材料や形状のばらつきを考慮して、骨組やコンポーネントの解析のためのパラメータと応答値の現実的な上・下限値を、少ない計算量で評価できるような探索手法を提案する。
- (6) これらの成果に基づき、高性能有限要素法による数値実験とランダム化アルゴリズムによる構造最適化手法を統合して、免震・制振デバイスの性能最適化のための数値実験システムの要素技術を開発する。

3. 研究の方法

- (1) 信頼性の高い汎用有限要素解析ソフトウェア (ABAQUS) と、ソリッドモデル

に基づく並列化性能に優れたソフトウェア (ADVENTURECluster) を用いて、免震デバイス繰返し荷重時の応答解析を実施する。

- (2) 材料実験から構成則のパラメータを同定するための発見的最適化手法を提案する。
- (3) パッシブ制振デバイスの性能最適化問題を効率よく解くための最適化手法を提案する。
- (4) 材料特性などのパラメータのばらつきを考慮して解析パラメータと応答範囲の推定法を提案する。

4. 研究成果

(1) 鋼材料の区分線形複合硬化則とパラメータ同定

ソリッド要素に基づく汎用有限要素解析ソフトウェアであるADVENTUREClusterを用いて、鋼構造物の弾塑性応答を評価する際の精度向上のため、J2降伏条件と、インプリシットかつアルゴリズムに定義される区分的線形硬化則を用いた新しい構成則を提案した。

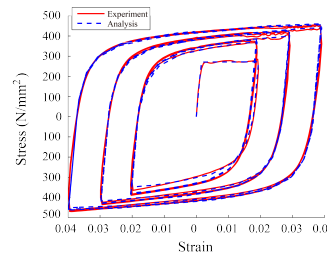


図1 鋼材料の単軸繰返し荷重特性
(実線：実験，点線：解析)

この構成則を用いると、図1に示すように、建設用鋼材特有の性質である降伏棚とバウシinger効果をモデル化でき、鋼材料の単軸繰返し荷重特性を精度よくシミュレートできる。また、図2に示すように、片持梁の非対称繰返し荷重実験の結果を、高精度で再現できることを確認した。

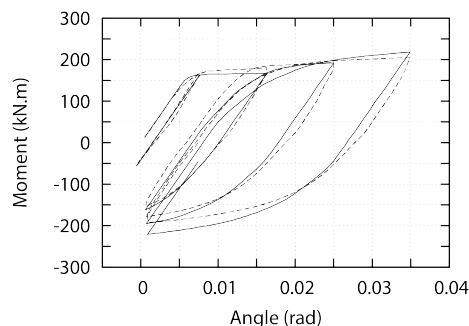


図2 片持梁の繰返し荷重
(実線：実験，点線：解析)

さらに、上記の構成則に対して、降伏応力、硬化係数、等方硬化と移動硬化の割合などを

同定するための最適化手法を開発した。この最適化問題は極めて非線形性が強いいため、ランダム性を有する発見的アルゴリズムと、クラスタリングや決定木などのデータマイニングの手法の利用が有効であることを示した。

(2) 確率的最適化手法

極めて非線形性の強い構造最適化問題に対して、大域的ランダム選択と局所的発見的手法（ランダム探索、タブー探索など）を組み合わせ、解の近似精度を確率統計的手法によって予測するための手法を開発した。

ランダム選択によって解を生成し、目的関数の値ではなく、順位を用いて解の精度を評価することにより、少ない解析回数で近似精度の保証された最適化が得られることを、簡単な数学的最適化問題と構造最適化問題で検証した。

さらに、数百回程度の関数評価しか許容されないような構造最適化問題では、遺伝的アルゴリズムのような解集団を保持する手法は、単一の解を保持する手法と比べて効率が悪いことを示した。

(3) 制振パネルダンパーの最適化

制振デバイスの例として、図3に示すような間柱型のせん断パネルダンパーを対象として、スチフナの位置と形状を最適化した。中央のパネル部分の材料は、極低降伏点鋼である。

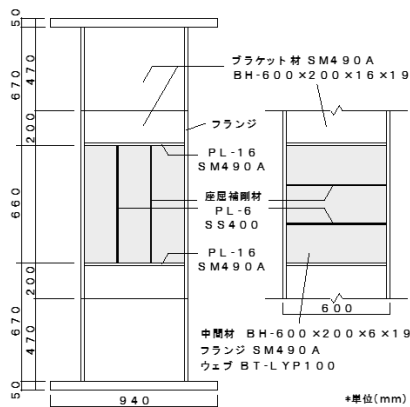


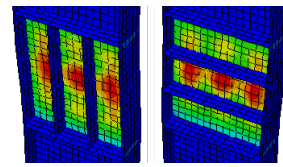
図3 間柱型制振パネルダンパー

解析にはABAQUS、最適化にはタブー探索を用い、解析モデルの作成とデータの出力にはPythonスクリプトを用いた。また、極低降伏点鋼の材料特性には複合硬化則を用い、そのパラメータは、パネルの既往の実験結果を用いて同定した。

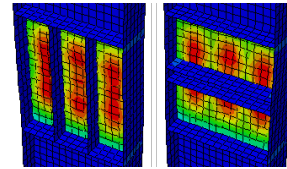
最適化の結果、水平スチフナを中央に移動させることにより、相当塑性ひずみが指定値に達するまでに消費できるエネルギーが増加することを明らかにした。図4に示すように、最適化することによって、パネル全体に塑性変形が広がり、多くの領域でエネルギーを消費されている。

また、スチフナの位置と厚さに加えてパネ

ルのアスペクト比を変更することにより、エネルギー消費性能が向上することを示した。



(a) 初期解



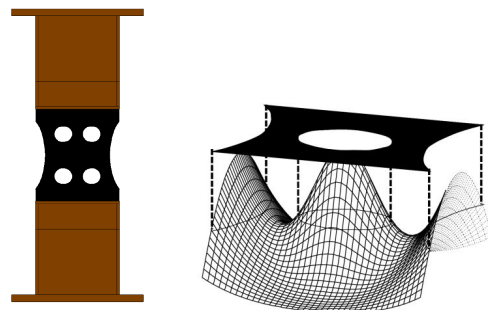
(b) 最適解

図4 制振パネルダンパーの相当塑性ひずみ分布

さらに、基準モデルと最適モデルの試験体を作成し、静的繰返し载荷実験を実施した。基準試験体は、加力が進むにつれて、荷重変形関係のループの面積が徐々に小さくなったものの、試験体は破壊には至らなかった。最適試験体は、基準試験体に比べてリブで囲まれたユニットのパネル面積が増加したため、パネルのせん断変形が大きくなり、座屈・亀裂が発生した。一方、基準試験体では、溶接の脚長も含めたスチフナの拘束効果が解析よりも強く働き、せん断パネルの塑性消費エネルギーが大きくなる結果となった。今後は、縮小試験体における溶接箇所適切な評価が重要である。

(4) 開口部を有する間柱型せん断パネルダンパー

図5に示すような開口部を有するせん断パネルダンパーを対象とし、開口部の形状を最適化した。開口部はRadial Basis Function、周辺部はベジエ曲面を用いたレベルセット法で形状を定義した。解析にはADVENTUREClusterを用い、形状の変更にもなってソリッド要素を再メッシュ分割を行わない構造メッシュ法を使用した。局所探索に基づく発見的手法であるタブー探索を用いて最適化することにより、塑性ひずみが指定値に達するまでに消費できるエネルギーが増加することを明らかにした。



(a) モデルの概要 (b) 開口部の定義

図5 開口部を有するせん断ダンパー

(5) パラメータのばらつきを考慮した解析パラメータと応答範囲の推定法

少ない回数の実験結果のデータから，数値解析結果の精度を検証する際に，実験結果の不確定性を考慮する手法を提案した。

まず，実験結果と解析結果のばらつきにつながる要因を，材料特性などの不確定量と，等価減衰定数や合成梁の剛性などの解析パラメータに分類した。材料特性などのパラメータのばらつきから応答の範囲を推定し，その範囲に適合するように解析パラメータを同定できる。また，実験と実設計のそれぞれの段階での不確定性を分類し，設計段階において各階の質量などにも不確定性がある場合は，応答のばらつきが極めて大きくなることを示した。

(6) CAD による形状生成

複雑な形状のデバイスを最適化するためには，(a) CAD による形状モデリング，(b) 有限要素モデリング(メッシュ自動分割)，(c) 有限要素解析，(d) 最適化による形状変更，の4つのプロセスを自動化するのが望ましい。そのため CAD ソフトウェア(Vectorworks)，有限要素モデラー(ADVENTURECluster Builder)，有限要素解析(ADVENTURE Cluster)を接続するためのインターフェイスを作成した。

(7) 免震支承の有限要素解析

天然ゴムの免震支承をソリッドモデルで分割し，静的繰返し載荷の解析を実行して，既往の実験結果と比較した。その結果，材料をOgdenモデルとすることにより変形にともなう硬化を再現でき，十分な精度を有することを確認した。

また，免震支承を骨組に設置し，300万以上の自由度のモデルを作成して地震応答解析を行った。このような解析により，骨組と免震支承の連成や局所的変形を同時に評価できる。さらに，免震ゴム内部での鉛直方向応力とせん断応力の不均一性の検討も可能となる。図6に，免震支承上部と基礎の間の鉛直方向接触力の分布を示す。

免震支承を RC 骨組に設置した地震応答解析の結果，圧力変動にともなって，同一の水平変位の下でも，各支承が負担する水平力は均一でないことを明らかにした。

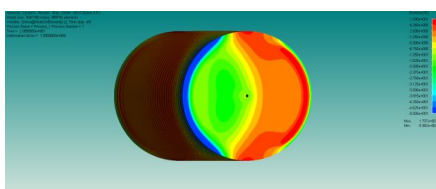


図6 免震支承上部と基礎の間の鉛直方向接触力の分布

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計6件)

大崎 純, 桂 正彦, 渡邊秀和, 引野 剛, 鋼構造骨組の実大実験結果を用いた解析パラメータの同定と地震応答のばらつきの評価, 構造工学論文集, Vol. 59B, pp. 201-209, 2013, 査読有.

野添順規, 大崎 純, 渡邊秀和, 有限要素解析と発見的手法によるせん断型鋼板ダンパーの最適化, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 78, No. 689, pp. 1247-1252, 2013, 査読有.

D. Isobe, W. S. Han and T. Miyamura, Verification and validation of a seismic response analysis code for framed structures using the ASI-Gauss technique, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 42, pp. 1767-1784, 2013, 査読有.

M. Ohsaki and M. Katsura, A random sampling approach to worst-case design of structures, Struct. Multidisc. Optim., Vol. 46, pp. 27-39, 2012, 査読有.

M. Ohsaki and T. Nakajima, Optimization of link member of eccentrically braced frames for maximum energy dissipation, J. Constr. Steel Res., Vol. 75, pp. 38-44, 2012, 査読有.

D. Isobe, L. T. T. Thanh and Z. Sasaki, Numerical simulations on the collapse behaviors of high-rise towers, Int. J. of Protective Structures, Vol. 3(1), pp. 1-19, 2011, 査読有.

(学会発表)(計23件)

T. Miyamura, M. Ohsaki, T. Yamashita, D. Isobe and M. Kohiyama, Dynamic collapse analysis of four-story steel frame using E-Simulator, Proc. 4th Int. Conf. on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (CompDyn2013), Kos, Greece, Paper No. 1494, 2013年6月14日.

M. Ohsaki, T. Miyamura, M. Kohiyama, T. Yamashita, M. Yamamoto and N. Nakamura, High-precision finite-element analysis of rubber bearing for base-isolation of building structures, Proc. 4th Int. Conf. on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (CompDyn2013), Kos, Greece, Paper No. 1205, 2013年6月14日.

H. Watanabe, M. Ohsaki and J. Nozoe, Shape optimization of energy dissipation devices for passive seismic control of building frames, Proc. Structures Congress 2013, ASCE, Pittsburg, USA, Paper No. 2487, 2013年5月3日.

M. Ohsaki, J. Y. Zhang, T. Miyamura, A heuristic algorithm for parameter identification of steel materials under asymmetric cyclic elastoplastic deformation, Proc. CJK-OSM7, Huangshan, China; Paper No. J045, 2012 年 6 月 12 日.

H. Watanabe, M. Ohsaki, J. Nozoe and S. Yasuda, Shape optimization of shear-type hysteretic steel damper for building frames using FEM-analysis and heuristic approach, Proc. 7th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems (CJK-OSM7), Huangshan, China, Paper No. J061, 2012 年 6 月 12 日.

M. Ohsaki and T. Nakajima, Optimization of energy dissipation property of eccentrically braced steel frames, Proc. 9th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO9), Shizuoka, Japan, Paper No. 081_1, 2011 年 6 月 15 日.

J. Y. Zhang and M. Ohsaki, Probability-based optimal design of moment-resisting frames using kriging approximation model, Proc. 9th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO9), Shizuoka, Japan, Paper No. 167_1, 2011 年 6 月 15 日.

M. Katsura and M. Ohsaki, Optimum design of steel frames considering uncertainty of parameters, Proc. 9th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO9), Shizuoka, Japan, Paper No. 081_2, 2011 年 6 月 14 日.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

大崎 純 (Makoto Ohsaki)
広島大学・工学研究院・教授
研究者番号：4 0 1 7 6 8 5 5

(2)研究分担者

磯部 大吾郎 (Daigoro Isobe)
筑波大学・システム情報工学研究科
・准教授
研究者番号：0 0 2 6 2 1 2 1

(3)研究分担者

宮村 倫司 (Tomoshi Miyamura)・講師
日本大学・工学部
研究者番号：3 0 2 8 2 5 9 4

(4)研究分担者

張 景耀 (Jingyao Zhang)
名古屋市立大学・芸術工学研究科・准教授
研究者番号：5 0 5 4 6 7 3 6

(5)研究分担者

山下 拓三 (Takuzo Yamashita)
防災科学技術研究所・兵庫耐震工学研究センター・研究員
研究者番号：4 0 5 9 7 6 0 5

(6)研究分担者

渡邊 秀和 (Hidekazu Watanabe)
東京工業大学・応用セラミックス研究所
・助教
研究者番号：2 0 6 2 0 6 3 6