

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760431

研究課題名(和文) 履歴・粘性複合型制振構造の動特性モデリングに基づく最適設計法とロバスト性解析法

研究課題名(英文) Optimal design and robustness evaluation of hysteresis and viscous damper via dynamic characteristics modeling of vibration control structure

研究代表者

吉富 信太 (YOSHITOMI SHINTA)

京都大学大学院・工学研究科・助教

研究者番号：30432363

研究成果の概要(和文)：本研究課題において以下の成果を得た。(1)粘弾性ダンパーや履歴ダンパーなどの制振装置の最適配置を見出すために、制振構造物を高精度な簡易解析モデルに縮約して最適設計の計算負荷を低減する方法の提案。(2)モデル縮約に利用可能な、建物応答から建物の剛性や減衰を推定する新たな物理パラメータ同定法の提案。(3)座屈拘束ブレースや高硬度ゴムなどの非線形ダンパー付き制振建物の縮約モデルを用いた最適ダンパー配置法の提案。得られた最適解に基づいて、設計条件のばらつきに対する頑健性の合理的な検討が可能となる。

研究成果の概要(英文)：In this research project, the following results are achieved. (1) New precision model reduction method is proposed for optimal placement of vibration control devices, i.e. hysteresis damper or viscoelastic damper. (2) New physical parameter identification method is proposed which can identify stiffness or damping performance of vibration control structure based on response records. (3) Optimal damper placement method for vibration control structure with nonlinear damper is proposed using reduced model. Robustness evaluation of vibration control structure can be performed based on the optimal design.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

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：制振構造, 縮約モデル, 最適設計, 非線形ダンパー, 物理パラメータ同定

1. 研究開始当初の背景

近年、耐震性能の向上を目的として、建築構造物に受動型制振装置を設置する設計が一般的に行われつつある。現在では、制振ダンパーなどの構成則の複雑な制振装置を有する大規模構造物についても、地震や風に対する時刻歴応答をシミュレートできる理論

や計算機環境はほぼ整備されつつあるといえる。その一方で、制振構造の実務設計の場面において、制振ダンパーの設計問題や配置問題に関する既往の研究成果は有効に利用されておらず、試行錯誤に伴う多大な労力が必要とされる。

既往の研究成果が実務利用されない1つの

理由として、既往のダンパー最適配置問題においては、せん断モデルに線形ダンパーを設置した単純な問題を扱っているものが多い点が挙げられる。実務上採用されることの多い、履歴型ダンパーや粘性ダンパーなどを混用した制振構造物は基本的には非線形の復元力特性を有するため、動的特性の理論的な解明は困難であり、建物個別に時刻歴応答解析を実施するのが一般的である。従って、非線形ダンパーの最適配置問題を構成して、実務上有用な知見を得るためには、ダンパーの非線形性を適切に考慮できるモデルを用いる必要がある。

また、従来の提案手法では、設計条件のばらつきが制振構造の設計に及ぼす影響という重要な情報を直接提示できないことも、実務設計で利用されないひとつの要因である。設計条件のばらつきとしては、制振ダンパーの材料特性や入力地震動の予期せぬばらつきに加えて、制振ダンパーの種類（履歴・粘性・粘弾性）、設置方法（直列・並列）、取付部材、ダンパーの剛性・減衰の割合、ダンパー量など設計者が意図する設計パラメーターの変更を含めたものを想定している。

これまでに研究代表者は、設計条件の変動が設計解に及ぼす影響を、異なる設計条件下の最適設計解の相互比較を通じて抽出する論理的なアプローチを提案しており、この考え方を制振ダンパー特性や設計条件のばらつきに対する影響評価問題へと拡張することが可能である。ただし、種々のパラメーターの変動に対する最適設計解を繰り返し求める必要があるため、パラメーターの変動を適切に反映でき、かつ、計算負荷の小さな解析モデルの開発が必須である。

2. 研究の目的

上記の背景を受け本研究では、(1)非線形ダンパーを有する制振構造物の高精度簡易応答評価モデルの構築、(2)動的応答を制約した複合型制振構造の最適設計法の構築を目的とする。

制振構造物の高精度簡易応答評価モデルとして、主体構造とダンパーを分離してそれぞれ少自由度モデルに縮約する手法を提案する。

主体構造の縮約においては、動特性や応答の等価性に基づいて縮約モデルの剛性や質量などの物理パラメーターを設定する。また、建物の応答に基づいて構造物モデルの物理パラメーターを推定する物理パラメーター同定法の利用についても検討する。

非線形ダンパーの縮約においては、非線形復元力特性は変更せずに、ダンパー量だけを適切に縮約する手法を提案する。この方法によれば、縮約前のダンパーの非線形性を損な

わないため、縮約モデルを用いた非線形時刻歴応答解析に、ダンパーの非線形性を適切に反映することができる。

これらの高精度な縮約モデルを用いて、非線形ダンパーの最適配置を見出す問題に対する簡便な解法を構築する。縮約モデルを用いることで計算負荷を低減できる。また単純な最適化手順を提案することにより、非線形時刻歴応答を制約した問題に対しても安定して解を得ることのできるロバスト性の高い手法とすることができる。

制振ダンパー特性や設計条件のばらつきに対する頑健性の解析のために、これらのばらつきを適切に考慮可能な解析モデルを用いた最適ダンパー配置解に基づく手法を展開する。

3. 研究の方法

(1) 制振構造物の高精度簡易応答評価モデルの構築

本研究では、制振ダンパーを設置した構造物の時刻歴応答解析の計算負荷を大幅に低減可能な縮約モデルを用いた手法を提案する。制振構造物の縮約モデルは、主体構造物の縮約とダンパーの縮約を個別に行うことにより、主体構造の動特性やダンパーの非線形性を保持したまま縮約モデルを構築することができる。さらに時刻歴荷重を調整することにより縮約モデルによる応答評価の精度を向上させる。

①主体構造の縮約

縮約前のモデルを原モデル、縮約後のモデルを縮約モデルと呼び、対象とする原モデルに応じて適切に縮約モデルを選択する。例えば建物があまり高層でなく全体曲げ変形の影響が小さい場合は、せん断モデルを用い、全体曲げの影響が無視できない場合は曲げせん断モデル、ダンパー周辺部の柱の伸縮まで考慮したい場合は静的縮約モデルなどを選択する。

縮約モデルの剛性や質量などの具体的な物理パラメーターは、原モデルと縮約モデルの等価性が満足されるように決定する。等価性条件として、1次固有モードの等価性や静的載荷時の変位の等価性などを利用する。

②時刻歴荷重の縮約

原モデルと縮約モデルは自由度が異なるため、一般には両モデルの等価性は常に満足させることはできない。そこで地震時に地動入力加速度により各自由度に生じる慣性力を地動慣性力と呼び、地動慣性力を調整することにより、時刻歴応答が等価になるようにする。

③ダンパーの縮約

履歴ダンパーは非線形の復元力特性を有している。また、オイルダンパーも線形粘性

減衰でモデル化されることが一般的であるが、実際の製品は過大な付加を防止するためにリリース機構を有しており、その場合の復元力特性は非線形となる。また粘弾性体をダンパーとして使用する場合も一般的には強い非線形性を有している。このような非線形ダンパーの解析法の1つに等価線形化があるが、等価性を仮定した条件から外れると精度が低下するという問題があるため、非線形ダンパーを複合して使用する場合には等価線形化は適切ではない。そこで、本研究では、非線形のダンパーの構成則はそのまま使用し、ダンパーの量を縮約する方法を提案する。等価線形化は、縮約モデルにおけるダンパー量を決定する際に用いるが、時刻歴応答解析においては、非線形の構成則を用いる。

(2) ノイズを考慮したシステム同定法による物理モデルの構築

本研究では縮約モデルの剛性や減衰といった物理パラメータを決定する必要がある。ここでは上述のモデルの等価性条件に基づく方法に加えて、建物の応答データに基づいて建物の剛性や減衰などの物理パラメータを推定するシステム同定法を利用する方法を提案する。縮約モデル導入の動機は、時刻歴応答を精度よく評価することにあるため、固有モードや固有円振動数といった動特性の等価性ではなく、等価性を保証したい時刻歴応答を直接用いたシステム同定法は有効であると考えられる。

研究代表者はこれまでに、全層の応答を同時に計測することなく同定対象層の直上及び直下の応答データだけに基づいて、同定対象層の物理パラメータ同定を行う手法を提案している。原モデルの応答のうち、縮約モデルと対応した自由度の応答のみを用いてシステム同定法を適用すれば、縮約モデルの物理パラメータが直接同定可能である。ただし、本来応答がある層を無視して一部の層の応答のみを使用する場合は、使用しない層の応答がノイズとして同定に影響を及ぼすことが予想される。そのため、ノイズの影響を低減するための手法について検討する。本研究では ARX モデルを導入することにより、時刻歴応答データを用いても、同定に用いる振動数領域の関数を滑らかにし、かつ、ノイズの影響を除去することを試みる。

本手法は線形モデルを対象としているため、非線形ダンパーを設置したモデルの応答に本手法を適用すると、非線形ダンパーの平均的な等価線形化された物理パラメータが求められることになる。等価線形要素で構成されるモデルについては、拡張 CQC 法等のモーダルアナリシスによる応答評価も可能である。

(3) 動的応答を制約した履歴・粘性複合型制振構造の最適設計法の構築

制振構造の動的応答を制約した制振装置の最適配置問題に対し、上述の高精度簡易応答評価モデルを利用することで、効率的かつ安定して最適解を得る最適化法を構成する。

まず、履歴・粘性系複合型制振ダンパーを有する構造物の動的応答制約条件を取り入れた最適設計法を構成する。本研究においては、主体構造物は諸元が与えられ、かつ、弾性範囲に留まると仮定し、制振ダンパーの量を設計対象とする。ダンパーの最適配置問題としては、最大応答を最も低減するように総量の指定されたダンパーを各層に配分する問題を扱う。最小化する応答は、頂部加速度応答や、各層水平変位、最大層間変位など必要に応じた量を選択する。

最適化の手順としては、計算負荷の低減と扱いの容易さを考慮した簡便なアルゴリズムを提案する。ダンパーの総量を0の状態から最適化を開始して最も応答低減効果の高い箇所にダンパーを少しずつ付加していくという単純な手順により、ダンパー総量の増加に伴う最適配置を逐次追跡することができる。本研究で扱う非線形の時刻歴応答はダンパー量に関する感度が滑らかでないため、感度情報に基づく精緻な数値最適化手法を適用しても、解が安定して求められない可能性があり、また、非線形性に起因する局所最適解を回避することも困難である。一方本提案手法によれば、局所最適解が得られる可能性は回避できないものの、少ない計算量で解が安定して求められるという利点に加え、全てのステップの解が各ダンパー総量レベルに対応した最適解となっているため、適切なダンパー総量決定のための有用な情報を提供できる点に特徴がある。

(4) 履歴・粘性複合型制振ダンパーの設計条件のばらつきに対する頑健性解析

実務設計では、履歴系・粘弾性系など複数種類の制振ダンパーを混用することが行われる。ダンパーの効くタイミングの異なる履歴・粘性系ダンパーを直列または、並列に用いると、両者が相補的に作用することにより、入力地震動や材料のばらつきに対する頑健性が期待される。このようなばらつきに対する頑健性に関する性質を分析する。

まず、履歴系や粘弾性系の制振ダンパーを設置した構造物について、詳細な解析モデルを用いて時刻歴応答解析を実施し、ダンパーの種類・量・組合せ方・取り付け方などの、ダンパーに関する種々のパラメータの変化や、入力地震動の変動が、制振構造物の応答に及ぼす影響を系統的に整理する。主要なパラメータのばらつきに対する頑健性について、最適設計解の相互比較のアプローチによ

り特性を抽出・分析する。

上述の縮約モデルを用いた最適ダンパー配置法を用いれば、制振ダンパーのばらつきに対する頑健性について、解析と設計の両方の視点から有用な情報を得ることができる。種々の例題について得られた知見は、制振構造物の設計における、重要な設計支援資料として利用する。

4. 研究成果

本研究課題においては、粘弾性ダンパーや履歴ダンパーなどの制振ダンパーを有する制振建物を対象とした制振ダンパーの最適配置法を提案し、その計算負荷低減のために、多自由度のせん断モデルや骨組モデルを自由度の小さな簡易解析モデルに縮約する方法について検討した。本研究課題で得られた成果は以下の通り。

(1) 制振構造物の高精度簡易応答評価モデルの構築

本研究では、制振ダンパーを設置した構造物の時刻歴応答解析の計算負荷を大幅に低減可能な縮約モデルを用いた手法を提案した。制振構造物の縮約モデルにおいては、主体構造物とダンパーを個別に縮約し、さらに時刻歴荷重を調整することにより、縮約モデルによる応答評価の精度を向上させる手法を提案した。

せん断モデル、曲げせん断モデルについては1次固有モードや固有周期の等価性に基づく縮約を行い、骨組モデルにおいてダンパー周辺部の柱の伸縮まで考慮したい場合は静的載荷時の変位の等価性や静的縮約モデルを利用した縮約を行った。また、リリーフ機構付きオイルダンパー、粘弾性ダンパー、履歴ダンパー等について、非線形のダンパーの構成則を保持してダンパーの量を縮約する方法を提案した。

縮約モデルにおいて地震時に地動入力加速度により各自由度に生じる荷重を調整することにより、非線形ダンパーを有するモデルに対しても、縮約モデルによる時刻歴応答評価の精度が向上することを示した。

(2) ノイズを考慮したシステム同定法による物理モデルの構築

せん断モデルを対象とした層の剛性、粘性減衰係数、履歴減衰定数などの物理パラメータの新たな同定法を提案した。物理パラメータ同定法を利用すれば、原モデルの応答に基づいて縮約モデルを適切に設定することが可能となる。ここで提案する同定法は、一般的な同定法とは異なり、全層の応答を同時計測することなく各層の物理パラメータを個別に同定できる一方で、観測データに含まれるノ

イズの影響を受けやすいという問題点を有している。この問題点を解決するために、時間領域のモデル化であるARXモデルを有効に利用することにより、ノイズによるばらつきを低減し、同定精度の向上を図ることが可能となった。また、一般的にはARXモデルを記述するためのARXモデルパラメータは、剛性や減衰などの物理パラメータとは対応しないが、ARXモデルパラメータと物理パラメータとの関係を数式で導いた。またARXモデルを用いて表現される伝達関数が振動数0において物理的なモデルの伝達関数と対応するようにARXモデルパラメータに制約条件を加える手法を提案し、ノイズの影響を低減した同定を実現した。

(3) 動的応答を制約した履歴・粘性制振ダンパー付き構造物の最適設計法の構築

非線形ダンパーを有するモデルを対象として、ダンパーの最適配置を見出す問題を展開した。モデルとしては、骨組モデル、曲げせん断モデル、せん断モデルを扱い、非線形ダンパーとしては、粘弾性ダンパー、リリーフ機構付きオイルダンパー、座屈拘束ブレース等を扱った。

実務設計では、全層に異なる量のダンパーを付加することは少なく、ある範囲の層に渡って等量のダンパーを付加することが一般的である。このようなグルーピングに対応させた縮約モデルを用いた場合、いずれのモデルにおいても、縮約モデルを用いて原モデルの最適解を追跡可能なことを示した。

座屈拘束ブレース付き骨組モデルを扱った場合については静的縮約モデルを利用して層数の自由度を有するモデルに縮約する手法を提案した。実務設計においても多層の骨組モデルを同じ層数のせん断モデルに縮約することは一般的に行われている。それに対し本研究の提案手法による縮約モデルでは、一般的な縮約モデルでは評価が困難な、ブレースの配置位置、ブレースタイプなどが時刻歴応答に及ぼす影響の評価を精度良く実施可能なことを示した。本研究の成果を利用すれば、動的応答を制約した履歴・粘性複合型制振構造の最適設計解に基づいて、設計条件のばらつきに対する頑健性を合理的に検討することが可能となる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- 1) 前田朋宏, 吉富信太, 竹脇出, 限定された地震観測記録とARXモデルを用いた建物の剛性・減衰同定法, 日本建築学会構造系

論文集, 査読有, No.666, 2011.8.

- 2) 辻聖晃, 国分宏樹, 吉富信太, 竹脇出: 非線形復元力特性を有する制振ダンパーの構造縮約モデルを用いた最適配置法, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, No.658, pp.2143- 2152, 2010.12
- 3) 吉富信太, 前田朋宏, 竹脇出, 内部に未知の振動源を有する建物の剛性と減衰の同時同定法, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol. 74, No.645, pp.1983-1991, 2009.11

[学会発表] (計9件)

- 1) 吉富信太, 竹脇出, 複数の振動源を有する建物のシステム同定のための独立成分分析による応答分離法, 日本建築学会大会(北陸), 2010.9.10, 富山大学
- 2) 桑原誠, 吉富信太, 竹脇出, 地震動に対する非観測応答データの外挿に基づく建物の剛性・減衰同時同定法, 日本建築学会大会(北陸), 2010.9.10, 富山大学
- 3) 前田朋宏, 吉富信太, 竹脇出, 上層部に未知の振動源を有する建物のシステム同定法その2: ARXモデルを用いたノイズバイアス補正法日本建築学会大会(北陸), 2010.9.10, 富山大学
- 4) S. Yoshitomi, T. Maeda, I. Takewaki, IMPROVED STIFFNESS-DAMPING SIMULTANEOUS IDENTIFICATION OF BUILDINGS INCLUDING UNKNOWN INNER VIBRATION SOURCE BASED ON ARX MODEL, 5WCSCM, 2010.7.14, 東京
- 5) S. Yoshitomi, M. Kuwabara, M. Tsuji and I. Takewaki, Stiffness and Damping Simultaneous Identification Based on Extrapolation of Unrecorded Response to Ground Motion, AIMM'10, 330-349, 2010.5.31, 韓国
- 6) 桑原誠, 吉富信太, 竹脇出, 地震動に対する非観測応答データの外挿に基づく建物の剛性・減衰同時同定法, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 2010.6.20, 大阪
- 7) 前田朋宏, 吉富信太, 竹脇出, 上層部に未知の振動源を有する建物のシステム同定法その2: ARXモデルを用いたノイズバイアス補正法, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 2010.6.20, 大阪
- 8) 前田朋宏, 吉富信太, 竹脇出, 上層部に未知の振動源を有する建物のシステム同定法, 日本建築学会大会(東北), 2010.8.27, 東北学院大学
- 9) 吉富信太, 竹脇出, 上層部に定常ランダム荷重入力を受ける建物のシステム同定におけるノイズの影響, 日本建築学会大会(東北), 2010.8.27, 東北学院大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

吉富 信太 (YOSHITOMI SHINTA)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 30432363