

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：34315
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23760525
 研究課題名（和文） ノイズを考慮した物理パラメータ同定法を用いた制振構造物の高精度縮約モデリング
 研究課題名（英文） High accuracy reduced model for vibration control

研究代表者
 吉富 信太（YOSHITOMI SHINTA）
 立命館大学・理工学部・准教授
 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)元の建物よりも自由度の小さい縮約モデルを用いた時刻歴応答解析法について精度向上のために荷重を調整する方法を提案した。(2)高層建物を想定した曲げせん断モデルに対するシステム同定理論を提案した。(3)静的縮約モデルを拡張した動的縮約モデルを提案し、骨組モデルと曲げせん断モデルとの関連づけを検討した。(4)建築骨組の縮小模型の振動台実験を実施して得られた応答の実測データを用いて提案手法の妥当性を検討した。

研究成果の概要（英文）：

In this research project, the following results are achieved. (1) New time history analysis method is proposed using reduced model with adjustment of seismic inertia force. (2) New system identification method is proposed for bending-shear model assuming high-rise buildings. (3) Static reduced method is expanded to Dynamic reduced method for the examination of relationship between a frame model and a bending-shear model. (4) Shaking table tests are performed to examine the validity of the proposed methods.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：構造解析

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：縮約モデル，高層モデル，システム同定，動的縮約

1. 研究開始当初の背景

実務設計における詳細な解析モデルである骨組モデルに対して、地震動や風荷重入力時の時刻歴応答を追跡可能な応答解析理論や計算機環境はほぼ整備されている。その一方で、制振機構を有する建築構造物の設計に

おいては、試行錯誤に伴う多大な労力が必要であり、制振ダンパーの合理的な設計法や配置法の整備が期待される。

制振ダンパー付き構造物の性能評価は、時刻歴応答解析に基づくことが一般的であり、ダンパーの効き具合を把握するために、主体

構造の変形状態を適切に反映できる解析モデルが必要である。さらに、時刻歴応答解析に基づく制振建物の最適設計問題を扱うためには、高精度かつ計算負荷の小さい縮約解析モデルを構築し、応答感度計算の負荷を低減することが必須である。これまでに非線形ダンパーを有する構造物のモデル自由度の縮約法が提案されているが、高次モードが卓越する場合の精度確保が課題である。

一方、建物振動の実測データに基づいて建築構造物のモデル化を行うシステム同定法に関する研究が数多くなされている。制振構造物の時刻歴応答解析のためには物理モデルの同定法が有用であるが、既往の成果の多くは数学モデルのパラメータ決定問題に帰着し、各パラメータから物理モデルの剛性や減衰を直接評価することは困難である。

実測データに基づく同定法において、常時微動など建物に複数の入力源がある場合の限定された観測データに基づくシステム同定法は十分展開されているとは言えず、振動の実測データに含まれるノイズの実態などは十分明らかになっているとは言えない。

2. 研究の目的

制振ダンパー付き構造物の設計においては、ダンパーの効き具合を適切に評価可能かつ計算負荷の小さい解析モデルが望まれる。本研究では、建物の剛性や減衰を直接同定可能な独自のシステム同定法を利用した制振構造物の小自由度かつ高精度の縮約モデルの構成法を提案する。

提案手法の理論的な妥当性は詳細モデルと縮約モデルの応答の等価性より保証され、縮約モデルと実建物の対応の信頼性は新しい同定法により確保される。本手法の確立により、新築建物の制振効果の高精度な評価のみならず、既存建物の耐震補強時における建

物実情に応じた適切なダンパー設置法を見出す最適設計法が統一的に実現できる。

3. 研究の方法

(1) 制振ダンパー付き構造物の高精度縮約モデルの構築

制振ダンパー付き骨組構造物の時刻歴応答を精度良く追跡可能な小自由度かつ高精度な縮約モデルを提案する。せん断型モデルや曲げせん断型モデルなどをベースとした物理モデルを構築するために必要なモデルの等価性条件を提案し、縮約モデル構成法を展開する。

まず、線形の物理パラメータを有する平面骨組モデルについて、各層を1自由度に縮約したせん断型構造物モデルや、2自由度に縮約した曲げせん断型構造物モデル等に縮約する方法について検討する。

また、モデルの縮約のみならず、外力の縮約を行うことにより解析精度の向上を図る。静的な外力に対する変位の等価性を利用した縮約地震時慣性力を導出する手法を構築する。外力の縮約はこれまでに提案されていない独自の概念である。

次に、制振ダンパーなど線形あるいは非線形の物理パラメータを有するモデルの縮約について検討する。制振ダンパーを有する骨組の縮約におけるモデルの等価性については、2つのアプローチから検討する。1つは、時々刻々の接線剛性や減衰などの構成則の等価性に着目するもので、他方は、消費エネルギーの等価性に着目するアプローチである。

(2) 高層モデルを想定した高精度縮約モデルの物理パラメータ同定法の展開

全体曲げ変形を生じる高層建物においてダンパーの効き具合を的確に表現するため

には、せん断モデルでは十分ではなく、曲げせん断モデルなどの適切なモデル化が必要である。本課題では高層建物を想定した適切なモデル化に、システム同定理論を利用する手法を提案する。上述の高精度縮約モデルに対する同定理論について検討する。これまでせん断モデルに対して展開されてきた地動入力時や内部振動源を有する場合の物理パラメータの同定理論の拡張可能性について検討し、解の唯一性が保証される問題構造について理論的に明らかにする。

実測データに含まれるノイズが同定精度に及ぼす影響について、シミュレーションにより振動レベルや入力の種類を変えて検討する。

(3) 静的縮約モデルの動的縮約モデルへの拡張

元モデルの自由度を縮約する手法として、これまでに静的縮約モデルが提案されている。この概念を拡張した動的縮約モデルの構築について検討する。

動的な応答の等価性を考慮に入れたモデルの縮約法を提案し、骨組モデルを用いた応答解析により得られた応答データと、骨組モデルに対応する動的縮約モデルの応答の比較により精度検証を行う。

(4) 縮小高層建物模型の振動台実験

高精度縮約モデルを介することにより、解析モデルと同定モデルを統合して実建物と縮約モデルの対応を明らかにできる。

建築骨組の縮小模型を用いた振動台実験を実施して得られた応答の実測データや、実建物の実測データを高精度縮約モデルの同定法に適用し、提案手法の妥当性を確認し、同定における混入ノイズについて分析する。

4. 研究成果

制振機構を有する建築構造物の設計においては、多数回の時刻歴応答解析を用いた試行錯誤が必要であり、合理的な制振ダンパーの設計法や配置法の整備が期待される。本研究課題では、制振建物の最適設計問題における、時刻歴応答解析に基づく応答感度計算の負荷を低減するために、高層建物においてもダンパーの効き具合を適切に反映できる高精度かつ計算負荷の小さい縮約解析モデルの構築を目的とする。そのために、縮約前後のモデルの応答の等価性に基づく曲げせん断モデル、動的縮約モデルの構築や、システム同定理論を利用したモデルの構築など、様々なアプローチでのモデル構築を試みた。以下に各成果の概要を示す。

(1) 制振ダンパー付き構造物の高精度縮約モデルの構築

これまでに、多自由度の原モデルの応答をそれよりも自由度の小さい縮約モデルを用いて評価する手法が研究されている。一般的な手法は、原モデルと縮約モデルの応答がよく対応するようにモデルの縮約法を工夫するのに対し、本研究では縮約モデルに作用させる荷重を調整することにより、縮約前後のモデルの応答の等価性を保証する点に特徴がある。特に振動数領域の応答の等価性を導入することにより、任意のモデル化に対応可能でかつ、変位だけでなく、速度、加速度についても理論的に等価性を保証できる高精度な手法を可能とした。

提案手法では、構造物のパラメータが変化したときに、荷重を再調整する必要がある。その際の計算負荷の低減を目的として、振動数領域におけるテイラー展開を利用して、荷重の調整分を少ない計算負荷で予測する手法についても提案した。本手法は汎用性の高い

手法であり、骨組モデルや曲げせん断モデルなど、種々のモデルについて適用可能である。

提案手法を利用して、非線形の特性を有するダンパーを設置した制振構造物の縮約モデルを用いた時刻歴応答評価を行い、ある程度の非線形性を有していても、提案手法により元モデルの応答を評価できることを示した。

(2) 曲げせん断モデルに対するシステム同定理論の構築

これまでに、せん断モデルの剛性や減衰等の物理パラメータを同定する手法が多く提案されている。本研究課題では、骨組モデルとより対応のよいモデルである曲げせん断モデルの同定法を構築した。曲げせん断モデルはせん断モデルと比べて、高層骨組モデルの上層部の全体曲げ変形を表現できるため、骨組モデルと応答がよく対応する。

提案手法を用いれば、高層骨組モデルの応答データを用いて、骨組モデルと対応する曲げせん断モデルの同定が可能となる。これを骨組モデルの縮約モデルの構築に利用することが可能となる。

(3) 静的縮約モデルの動的縮約モデルへの拡張

元の建物よりも自由度の小さい縮約モデルを用いた時刻歴応答解析法について整備した。本手法は骨組モデルをせん断自由度のみのモデルに縮約することが可能である。特にこれまで提案されている静的縮約モデルを拡張した動的縮約モデルを新たに構築し、計算負荷を低減した手法を提案した。

静的縮約モデルを導入することにより、骨組モデルと曲げせん断モデルとの関連づけを可能とし、システム同定に利用する手法を提案した。静的縮約モデルに対するシステム同定理論をプログラム実装し、振動数領域の

シミュレーションや、時刻歴応答解析の結果などを用いて提案手法の妥当性を確認した。まず骨組モデルの時刻歴応答解析を行い得られた応答を実測データとして利用することにより、提案手法の妥当性を理論的に確認し、さらに実際に計測された超高層建物の地震時の応答波形を用いて提案手法に適用し、妥当性を示した。

(4) 縮小高層建物模型の振動台実験

提案手法の妥当性を示すための実験による検討を行った。一般的に建築構造物の小型模型を用いた振動実験は、せん断型構造物とする場合が多いが、高層建物の全体曲げを再現できるように、骨組モデルの縮小模型を作製した。

建築骨組の縮小模型を用いた振動台実験を実施して得られた応答の実測データや、実建物の実測データを高精度縮約モデルの同定法に適用し、提案手法の妥当性を確認するとともに、実測データに含まれるノイズが同定精度に及ぼす影響について検討した。

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2件)

- ① M. Kuwabara, S. Yoshitomi and I. Takewaki, A new approach to system identification and damage detection of high-rise buildings, Structural Control and Health Monitoring, volume 20, 2013, p703-727, DOI: 10.1002/stc.1486, 査読: 有
- ② Y. Minami, S. Yoshitomi and I. Takewaki, System identification of super high-rise buildings using limited vibration data during the 2011 Tohoku (Japan) earthquake, STRUCTURAL

CONTROL AND HEALTH MONITORING, volume 1, 2012, p1-22, DOI: 10.1002/stc.1537
査読：有

〔学会発表〕（計 12 件）

- ①吉富信太, 小豊直英, 辻 聖晃, 竹脇出, 伝達特性の差の補償機能を有する自由度縮約モデルを用いた時刻歴応答評価法, 日本建築学会大会（東海）, 2012年09月14日, 名古屋大学東山キャンパス（愛知県）
- ②金城陽介, 吉富信太, 竹脇出, 部分空間法と同定関数を用いた建築構造物のシステム同定, 日本建築学会大会（東海）, 2012年09月13日, 名古屋大学東山キャンパス（愛知県）
- ③桑原誠, 南良忠, 吉富信太, 竹脇出, 曲げせん断型モデルとARXモデルを用いた高層建物のシステム同定と損傷同定 その1理論, 日本建築学会大会（東海）, 2012年09月13日, 名古屋大学東山キャンパス（愛知県）
- ④南良忠, 桑原誠, 吉富信太, 竹脇出, 曲げせん断型モデルとARXモデルを用いた高層建物のシステム同定と損傷同定 -その2- 数値シミュレーション, 日本建築学会大会（東海）, 2012年09月13日, 名古屋大学東山キャンパス（愛知県）
- ⑤金城陽介, 吉富信太, 竹脇出, 部分空間法と同定関数を用いた建築構造物のシステム同定, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 2012年6月17日, 大阪工業技術専門学校（大阪府）
- ⑥桑原誠, 南良忠, 吉富信太, 竹脇出, 曲げせん断型モデルとARXモデルを用いた高層建物のシステム同定と損傷同定 その1理論, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 2012年6月17日, 大阪工業技術専門学校（大阪府）

- ⑦南良忠, 桑原誠, 吉富信太, 竹脇出, 曲げせん断型モデルとARXモデルを用いた高層建物のシステム同定と損傷同定 その2数値シミュレーション, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 2012年6月17日, 大阪工業技術専門学校（大阪府）
- ⑧吉富信太, 小豊直英, 辻聖晃, 竹脇出, 伝達特性の差の補償機能を有する自由度縮約モデルを用いた時刻歴応答評価法 その1：振動数領域の応答の等価性に基づく手法, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 2012年6月17日, 大阪工業技術専門学校（大阪府）
- ⑨小豊直英, 吉富信太, 辻聖晃, 竹脇出, 伝達特性の差の補償機能を有する自由度縮約モデルを用いた時刻歴応答評価法 その2：建物の剛性・減衰の変動に関する変換地動慣性力の簡易評価法, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 2012年6月17日, 大阪工業技術専門学校（大阪府）
- ⑩桑原誠, 吉富信太, 中村尚弘, 竹脇出, ARXモデルと伝達関数を用いた曲げせん断モデルの剛性・減衰同定法, 日本建築学会大会（関東）, 2011年8月24日, 早稲田大学早稲田キャンパス（東京都）
- ⑪南良忠, 吉富信太, 竹脇出, 線形履歴減衰を有する建物のARXモデルを用いた減衰同定法, 日本建築学会大会（関東）, 2011年8月24日, 早稲田大学早稲田キャンパス（東京都）
- ⑫吉富信太, 竹脇出, モデルの自由度縮約に伴う伝達特性の変化を考慮した高精度時刻歴応答評価法, 日本建築学会大会（関東）, 2011年8月23日, 早稲田大学早稲田キャンパス（東京都）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉富 信太 (YOSHITOMI SHINTA)

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号：30432363