

氏 名	飛 田 潤
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成元年3月24日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 建築学専攻
学 位 論 文 題 目	実応答記録に基づく建築構造物の振動 システムの特性に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 和泉 正哲
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 和泉 正哲 東北大学教授 柴田 明德 東北大学教授 杉村 義広

論 文 内 容 要 旨

建築構造物の地震動などの外乱による応答を的確に評価し、さらにその予測を行なうことは、設計をはじめとする建築活動全般においてその安全性の確保に関連して非常に重要であり、そのためには、ある特性を持つ構造物系の応答を予測する解析手法の検討と並んで、実際の応答における構造物の特性を実記録から適切に把握することが不可欠と言える。これは理論解析に用いるモデルの構成のための情報であることはもちろんであるが、さらに実際の現象の多くは特定の理想的なモデルでは捉えられない成分を含み、それらの存在と影響を知ることが、応答の評価とその信頼性を考えるにあたって必要となるからである。また特別に安全性を重視する必要がある重要構造物の設計や、減震構造物の応答制御など、近年ますます増加してきた特殊で条件の厳しい問題において、実応答の適切な評価はさらに重要である。

しかし建築構造物の実応答においては、様々な未知・不確定の現象の影響が小さくなく、これらの影響を適切に評価し、またはその現象を特定のモデルによって表現することが困難な場合も多い。実応答記録による解析は多々行なわれ、多くの知見が得られてはいるものの、解析的な応答評価技術の向上に比して、実現象に関する理解は十分とはいえない現状にあると考えられる。

実記録を用いた特性の評価にあたっては、構造物等における多成分同時観測記録について、得られた各成分の特性のみならずそれらの間に成り立つ関係を的確に捉えることが物理的にも有効であ

り、このような関係を、支配する物理現象の理解も含めて、本研究では（振動）システムと呼んでいる。上述の問題に対して、未知なまたは不確定な現象の影響を含む実際の建造物の振動システムの特性を、良質な多数の実応答記録（地震および常時微動に対する応答）から明らかにし、それらを表現できるモデルを構成し、さらにその影響について考察することが本研究の目的である。

この際に成分間の関係を評価するために、等価線形系の伝達関数と残差としてのコヒーレンス関数、および線形パラメトリックモデルの最適化とその最適化誤差、の二手法を主に比較して用いており、様々な要因による実システムの特性を、最も一般的関係と考えられる線形性をフィルタとして示し得ている。特に線形性を基準とした手法によって表現できない残差成分をシステムの広義の（定常線形系から見かけ上はずれる）非線形特性による影響の情報として意味づけて整理・考察し、さらに実現象を表現するモデル構成のための有効な指標としている点がアプローチ上の特徴である。

結果として、広義の非線形性として実記録から検出されるシステムの特性は、5章で扱う地震応答については固有振動特性の変化・変動・ばらつきであり、また6章で扱う常時微動においては複数の入力による影響である。これらに加えて大きな履歴特性を持つ場合については4章において手法の検討としてシミュレーションによって扱っており、手法上では広義の非線形特性を持つシステムの等価線形表示とその残差の特性に関する研究としての意味も持っている。

本論文は以下の7章で構成されている。

第1章 序 論

本研究の背景と目的、手法と成果の特徴、論文の構成について述べている。

第2章 関連する既往の研究の概観と本研究の特徴

まず上述の二手法について、実記録に適用した従来の研究における扱いと期待される意味について整理し、システムの広義の非線形性に関連する指標とする本研究での考え方が、それらをふまえた上で特徴のあるものであることを述べている。

次に、本研究の結果に関連するものとして、建造物の実地震応答における特性の変動傾向を豊富な実応答記録によって示した例が少ないことを述べ、この変動が応答に及ぼす影響について検討した解析的研究を挙げてその実記録による特性抽出の必要性を示している。常時微動に関しては、従来の手法では応答の振動システムの構造が明確にされていないことが多く、利用にあたっての障害になっていることから、やはりシステムの検討の必要性を述べている。

第3章 観測対象建物と記録の概要

以下の章で用いる実応答記録の観測対象建物と測定系統、記録の概要について述べる。

地震応答については、かなり特性の異なる三通りの建造物を対象としており、それぞれ20～30地震の記録を対象とする。また常時微動については建物の高さの相違と観測条件の相違によって数通りのケースを行なっている。

第4章 振動システムの特性の評価に関する検討

本章では上述の、伝達関数とコヒーレンス関数、およびパラメトリックモデルの最適化と最適化誤差、の二手法の特性およびその関連についてシミュレーションデータを用いて検討し、この二つのアプローチによる振動システムの広義の非線形特性の検出と表現の特性という本研究の特徴的扱いについて述べている。

まず二成分間の最適線形推定である伝達関数とその残差であるコヒーレンス関数について、定常線形からはずれるという意味でのシステムの広義の非線形性の影響は、特にコヒーレンス関数の低下の形状にそれぞれ異なる特徴として現れることを示した。振動システムの場合は固有振動数付近で低下する特徴がみられ、特に明確な履歴系が存在する場合にはその性質と非線形性の程度によって明確な傾向を示す。またこれらの関数の計算において、多くの地震記録をサンプルとするアンサンブル平均、一地震の記録による周波数平滑化、さらに一地震を時間軸上で細かく分割した非定常特性を求めることによって、様々な母集団に対するシステムの線形性からのずれが評価でき、さらに明確な情報が得られ、実応答における評価指標としての有用性を示している。

つぎに線形パラメトリックモデルを仮定した上での最適化手法が、得られた最適化モデルの特性のみならず、そのモデル構造によって表現できない残差としての最適化誤差の特性にも注目する事によって、振動システムの広義の非線形性の検出に有用であることを示している。この場合もある記録全体で最適化するか、さらに時間軸上で分割して各区間で最適化するかによって得られる情報が異なり、またそれらの間には関連があることを示している。

さらに上記の二手法について、得られる線形部分の特性、及びそれからはずれる残差の特性の間にはそれぞれ明確な関連があることを示している。特に残差成分については、コヒーレンス関数の形状をその低下率として数値化し、また最適化誤差は周波数特性としてスペクトル化することによって、非線形性の特徴と程度に関する情報としてよく対応することを示している。

第5章 構造物の地震応答における振動システムの特性

本章では、前章の手法を用いて実地震応答における振動システムの特性について明らかにし、さらにそれを表現できるモデルを考察し、その特性が応答評価に及ぼす影響に関する検討も加えている。ここでは、多くの地震を次々に経験することによる構造物の固有振動特性の長期的変化と、ある地震中の非定常な特性の変動、さらにそれらのランダムなまたは原因不明のばらつきなどがシステムの広義の非線形性として扱われている。

まず伝達関数とコヒーレンス関数によって、一般に二成分間に成立する振動システムの固有振動数付近でコヒーレンス関数が低下する傾向があり、固有振動数付近での特性が各地震中にもまた地震毎にも一定でないことを述べた。また特殊な非線形性を持つ構造物も対象とし、コヒーレンス関数に特徴的な形状が現われることを示してこの手法の有用性も述べている。

次に線形モーダルモデルを最適化することによってモーダルパラメータを推定し、その傾向は、主に長期的な特性の変化、一地震中の振幅に依存した非線形特性、さらにその他のばらつき・ゆらぎによるものであることを多数の地震応答記録によって明らかにしている。通常の建物の固有振動

数については、いくつかの地震を経験することによる剛性の低下と、入力レベルに対する低下を区別して明確に示し得た。一方減衰定数に関しては、その評価手法と得られた結果に関して不確定な成分が多く、その評価が重要であることを述べた。また免震構造物に関しては明確でかつ特殊な振幅依存性があること、軟弱地盤上の抗基礎建物では入力レベルに応じて連成系のシステム励起の状態が異なることなど、いくつかの建物の実応答におけるシステムの特徴についての知見を得た。

またこれらの特徴を考慮したモデルを構築し、その応答の非線形性が実記録をよく表現することをコヒーレンス関数等を指標として明らかにした。この検討は、上述のコヒーレンス関数の特徴を指標とする考え方によって示し得たことといえる。

以上の結果は、応答評価において重要な固有振動特性を、一定として扱えない可能性を示している。実記録の結果から特性変動の幅を読みとった上で、応答最大値の評価の確率特性について簡単なシミュレーションを行ない、特に減衰の評価の影響が大きいことを指摘、確認した。

第6章 構造物の常時微動における振動システムの特徴

本章では従来明確ではなかった常時微動における振動システムの特徴をいくつかの構造物の特性によって示し、一般に観測成分の間の位相差が小さく物理的入出力関係とみなしにくいことを明らかにした。またその原因として風力の影響による特性の変化を明確に示し、さらにそのシステム構造を地盤からの入力と風力による応答が混在するモデルとして表現した。このモデル構造の妥当性はコヒーレンス関数の特徴によって示され、さらに風力の影響を示すパラメータをコヒーレンス関数等から同定できることも示した。以上の検討はコヒーレンス関数等を用いてシステムの非線形特性を考慮することにより、初めて明確にし得たことといえる。

またこの結果は、常時微動記録を用いるにあたっての様々な手法の信頼性を検討できる可能性を与える。従来用いられたパラメータ推定手法の一例について検討し、特に減衰定数の評価が風力によって過大になる傾向が大きいことをモデルにより示した。

第7章 結 論

本研究で得られた知見を、アプローチ手法上では線形システムを通じた非線形特性の評価、または非線形システムの線形化における残差の特性に関する研究として、また実際の構造物の応答特性の評価に関しては、様々な入力や環境の変化による実振動システムの特徴の変化・変動について扱った研究として分類して位置づけ、まとめて述べている。

審査結果の要旨

建築構造物の地震等に対する応答特性を的確に予測することは、耐震設計をはじめとして安全性に関連して重要であり、そのためには構造物の実際の応答特性を正確に評価することが必要となる。しかし建築構造物の応答は、未知な、あるいは不確定な要因の影響を多く受けており、それらの適切な評価と解析への活用は必ずしも十分ではない。

本論文は、実際の構造物で観測された多数の記録を用い、各成分間の関係を基に実応答における振動特性を詳しく論じたものであり、その際に特定の手法やモデルで表現できない残差成分をも積極的に情報とする考え方を示し、それによって構造物の実応答における複雑で確定しにくい現象を多面的に捉えたものである。内容は以下の全7章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の意義・目的を述べ、手法・構成上の特徴を述べている。

第2章では、関連する既往の研究について、いくつかの観点から概観し、本研究における扱いがそれらをふまえた上でさらに特徴のあるものであることを明らかにしている。

第3章は、以下で用いる実応答記録に関して、観測対象建物の概要、観測体制と機材、得られた記録の諸元などを示している。

第4章では、伝達関数とコヒーレンス関数、およびパラメトリックモデルの最適化と最適化誤差、の二手法の特性およびその関連についてシミュレーションデータを用いて明確にし、この二つのアプローチによる振動システムの広義の非線形特性の検出と評価という本研究の特徴的扱いの有用性について述べている。

第5章では、構造物の地震応答における固有振動特性の変動を、前章のアプローチを多くの地震記録に適用して示しており、構造物の応答を見積るにあたって重要な固有振動特性が一定と見せないことを明らかにするとともに、実際に起った変動の傾向と程度を考慮して応答評価に与える影響を検討している。

第6章では、従来、特性が不明瞭なまま利用されてきた構造物の常時微動に関して、その振動システムの特徴をいくつかの構造物について検討し、特に風力の影響によるシステムの変化を示したうえで、地盤入力に対する応答と風力による影響が混在するモデルによってシステムの構造を明確に表現し得ている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、建築構造物の地震等に対する応答特性について、多くの実応答記録の関係から捉えるアプローチを示し、従来明確でなかった不確定な特性とその影響を明らかにしたもので、観測記録の理解と利用に関して多くの知見を与え、建築構造学ならびに耐震工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。