

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 7 月 25 日現在

機関番号：92502

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560691

研究課題名(和文)時刻歴応答解析に適用可能な新たな減衰モデル

研究課題名(英文)New damping model available to time history response analysis

研究代表者

中村 尚弘(Nakamura, Naohiro)

株式会社竹中工務店 技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：50416640

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：建物の地震応答解析などの動的解析において、減衰モデルの適切な選定は重要な課題である。一般に材料の減衰定数(h)は、振動数に対しほぼ一定であることが知られているが、大規模なFEMモデル等の時刻歴解析に対して、この性状を高精度に表せる実用的な減衰モデルは無く、課題となっていた。本研究者はこれまで振動数依存性の強い関数を時間用領域に変換する方法を検討し、高精度かつ実用性の高い減衰モデル(因果的履歴減衰モデル)を提案してきた。本研究では、これの改良と最適化を図るとともに、さらに有効性の高い新たなモデル(修正Rayleigh減衰モデル)を提案した。

研究成果の概要(英文)：For dynamic analysis such as the earthquake response analysis of buildings, the selection of damping model is a very important problem. It is well known that the damping ratios (h) of many materials are almost constant against the frequency, generally. However, there is no practical model which can express those characteristics and be available for large scale 3 dimensional FEM models. This researcher has studied the time domain transform method of strong frequency dependent functions, and proposed highly accurate and practical damping model (Causal hysteretic damping model). In this study, this model is improved and optimized. Moreover, more efficient new damping model (Updated Rayleigh damping model) is proposed.

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：建築構造・材料 時刻歴応答 減衰モデル 振動数依存性 有限要素法 Rayleigh減衰 因果的履歴減衰

1. 研究開始当初の背景

多くの材料の内部減衰は、履歴吸収エネルギーが振動数にあまり依存しないことが知られている。このような振動数非依存特性を表す減衰モデルは履歴減衰（または複素減衰・構造減衰等）と呼ばれている。構造物の応答評価において、構造物の1次振動数周辺だけでなく高振動数域まで応答を高精度で評価したい場合（例えば原子力施設の耐震解析）では、特にこのような減衰モデルの適用が重要となる。振動数領域の解析では、実部・虚部とも ω に対し一定とする複素ばねモデルがよく用いられる。しかし強震時の非線形の影響を考慮するためには、時刻歴応答解析を行う必要がある。特に今日では、計算機能力の向上により、解析対象を忠実にモデル化した大規模 FEM モデルによる時刻歴応答解析が行われるようになってきている。

現在、FEM の時刻歴解析を行う場合には Rayleigh 減衰が用いられることが多い。しかしこのモデルは2個の振動数(f_1, f_2)で減衰定数を規定しているのみで精度が十分高いとは言えない。また近年 Hall は、この減衰の非線形問題への適用が応答の過小評価に繋がるとして注意を喚起している。

一方、高振動数域まで高い応答精度が求められる場合（例えば原子力施設の耐震解析）には、歪エネルギー比例型が用いられる。このモデルは高精度であるが、全次数の固有値解析が必要で、かつ作成される減衰行列がフルマトリクスになる。このため、大規模な FEM モデルには計算負荷が過大となり適用が難しいのが現状である。

2. 研究の目的

建物の耐震解析、特に原子力施設の耐震解析では、従来の質点系モデルから、より詳細な3次元 FEM の解析に向かっている。この施設では、設計で評価すべき原子炉容器等の機器配管が多様な共振振動数を有するため、広範な振動数域で高精度の応答解析が必要である。

現在の質点系モデルに対しては、歪エネルギー比例型減衰が用いられているが、大規模3次元 FEM モデルに対しては、この方法の適用は困難で、精度の不十分な Rayleigh 減衰しか選択肢がないのが現状である。これに代わり大規模 FEM モデルに適用可能な新たな減衰モデルが求められている。

また、地盤の減衰は、振動数に対し一定な履歴減衰と、振動数に対し右下がりの散乱減衰の和とされている。この振動数依存性は非線形化に伴い変化することが考えられる。現状ではこの性状を適切に表される減衰モデルはない。

これらに共通する課題は、現時点で振動数依存性を明示的に表し、各種の問題に適用可能な実用的な減衰モデルが存在しないことである。本研究は、これに対し有効な提案を行うことを目的としている。

3. 研究の方法

本研究者はこれまで振動数依存性の強い関数を時間領域に変換する方法を検討し、この方法を応用して、高精度かつ実用性の高い減衰モデル（因果的履歴減衰モデル）を提案した。

本研究はこのモデルの改良と最適化を図るとともに、これを用いたさらに有効性の高い新たなモデル（修正 Rayleigh 減衰モデル）を提案するものである。検討は以下の手順で実施する。

(1) 因果的履歴減衰モデルの改良検討

因果的履歴減衰モデルは、振動数0Hz近傍で減衰定数が急速に0に近づく（0Hzよりやや大きい振動数で減衰定数が大きな値となる場合がある）検討振動数域の中央付近で減衰定数が小さな値となる場合がある、等の課題がある。線形問題、非線形問題によるパラメータ・スタディを行い、これらに対する改良法を検討する。

(2) 因果的履歴減衰モデルの最適化検討

因果的履歴減衰モデルは、時間遅れ成分の数（例えば4項モデル、8項モデル、18項モデルなど）。や導出方法（複素数からの時間領域変換か、虚数部のみからの時間領域変換か）により多数のバリエーションが存在する。各種の例題への試検討を通じて、時間遅れ成分の数が少なく（計算負荷が小さく）、かつ精度が良好となる推奨モデルの検討を行う。

(3) 修正 Rayleigh 減衰モデルの提案

FEM の時刻歴応答解析の減衰モデルとしては、Rayleigh 減衰モデルが現在広く用いられている。新たな減衰モデルとして、このモデルの改良を行う。Rayleigh 減衰モデルは、2個の振動数 f_1, f_2 に減衰率 h_1, h_2 （ここでは $h_1=h_2$ とする）を与える。 f_1, f_2 以外では減衰率はユーザーの期待通りとならず、 h_1, h_2 より低下した谷となってしまう。そこで、時間遅れ成分を用いて、 f_1, f_2 間の減衰率がほぼ一定となるモデルを提案する。また、このモデルを各種の例題に適用し、有効性を確認する。

4. 研究成果

(1) 因果的履歴減衰モデルの改良と最適化

前記の ~ の課題に対して検討し改良を加えた。さらに、計算負荷が小さく、かつ精度が良好となる推奨モデルとして、新たに作成した9項モデルを選定し、パラメータ解析により有効性を検討した。

(2) 修正 Rayleigh 減衰モデルの提案

新たな減衰モデルとして、質量比例型減衰モデルと因果的履歴減衰モデルの結合モデル（修正 Rayleigh 減衰モデルと称する）について検討した。各種の比較検討より、質量比例型減衰モデルと組み合わせた場合に最適

となる因果減衰モデルとして、2 項モデルを提案した。これを用いることにより、以下の大きな改善効果が得られた。

計算の効率化：修正 Rayleigh 減衰モデルの計算では、通常の Rayleigh 減衰モデルの計算に加えて、過去の変位の係数を用いる。(1)の因果的履歴減衰モデルでは、過去の9点の変位を必要としたが、これが2点に低減され、計算の負荷も大幅に低減した。

精度の大幅な向上：指標としている安定振動数域 (h が目標に対して一定誤差内に収まる振動数の範囲。最小振動数に対する最大振動数の比で表す) では、Rayleigh 減衰モデルの5倍以上の拡大となった。例えば $h=3\%$ の場合、6Hz から 82Hz までが誤差 5% 以内 (すなわち $h=2.85 \sim 3.15\%$ の範囲内) で計算できる。

(3) 有効性の確認

図1に示すドーム型の構造物を用いて、各減衰モデルの有効性の確認を行った。水平1次振動数は 5.0Hz、鉛直1次振動数は 12.2Hz である。減衰定数 $h=3\%$ として、複素減衰を用いて周波数応答解析を行って得られた伝達関数 (図の Freq.) を目標値として、従来の Rayleigh 減衰モデルを用いた時刻歴応答解析からの結果を図2に比較する。Rayleigh-1 と 2 は h_1 と h_2 の設定が異なるが、いずれの設定でも、振動数域全体を良好に対応させることはできない。

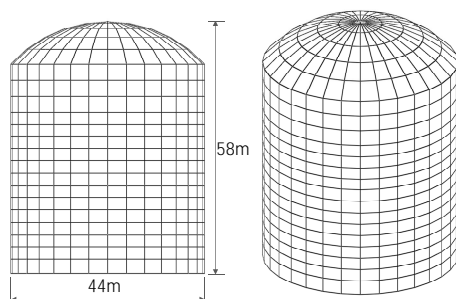


図1 解析モデル

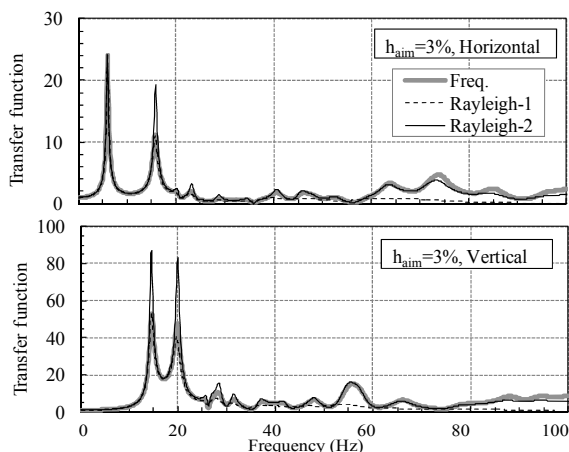


図2 Rayleigh 減衰モデルの伝達関数

図3は、提案する修正 Rayleigh モデルを用いた結果である。5 ~ 90Hz 付近まで、目標値と良好に対応する。これより、このモデルが広い振動数域で一定の減衰定数を与えられる高精度なモデルであることがわかる。

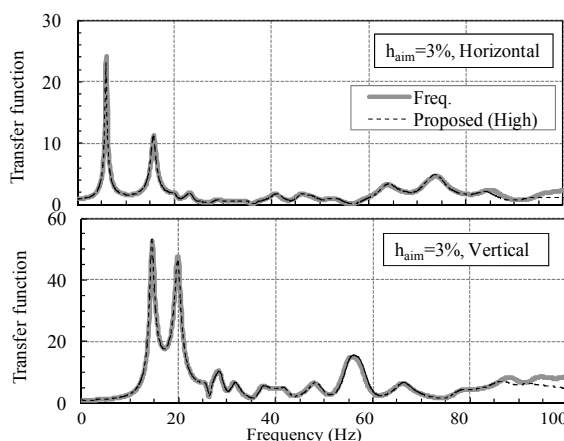


図3 修正 Rayleigh 減衰モデルの伝達関数

このようなモデルは前例がなく、各種の動的解析に極めて有効性が高いことを確認した。引き続き、このモデルの非線形問題への適用性について検討を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

Naohiro Nakamura, Response Analysis of Soil Deposit Considering Both Frequency and Strain Amplitude Dependencies Using Nonlinear Causal Hysteretic Damping Model, *Journal of Earthquakes and Structures*, 査読有, Vol.4, No.2, 2013, 181-202

Naohiro Nakamura, A Basic Study on the Transform Method of Frequency Dependent Functions into Time Domain -Relation to Duhamel's integral and time domain transfer function-, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 査読有, Vol.138, Issue 3, 2012, 276-285

〔学会発表〕(計8件)

中村尚弘, 他: 時間領域地震応答解析への複素減衰の適用に関する検討, 日本地震工学会第10回年次大会梗概集, 東京, 2013.11

中村尚弘, 他: 2011年東北地方太平洋沖地震における超高層SRC建物の減衰性状の検討, 第62回理論応用力学講演会, 東京, 2013.3

中村尚弘: 地盤と建物の動的相互作用を考慮した減衰評価式「建築物の減衰機構とその性能評価」に関するシンポジウム, 日本建築学会, 東京, 2013.3.1

中村尚弘: 振動数に依存する関数の時間領域変換法とその適用性に関する検討, 第17回計算工学講演会論文集, 京都, 2012.5

Naohiro Nakamura, et al.: Nonlinear Response

Analysis Method of Viscoelastic Damper
Considering Temperature, Frequency, and
Strain Dependencies, Eurodyn2011, Leuven,
Belgium, 2011.7

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 尚弘 (NAKAMURA NAOHIRO)
竹中工務店・技術研究所・主任研究員
研究者番号：50416640

(2) 研究分担者

鈴木 琢也 (ONIMARU SADATOMO)
竹中工務店・技術研究所・研究員
研究者番号：00470310

(3) 連携研究者

なし