

## 論文の要旨

題目 因果性に基づく減衰モデルの3次元有限要素モデルによるRC非線形地震応答解析への適用に関する研究  
(Study on Application of Causality-Based Damping Model to Nonlinear Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Structures Using 3-Dimensional Finite Element Model)

氏名 太田 成

従来の建築分野における地震応答解析では、コンピュータの性能の制約により、簡易的な多質点系モデルによる時刻歴応答解析が行われてきた。しかし最近では、計算機の性能向上に伴い、高度な検討が要求される建物の安全性検証のために、詳細な3次元骨組や有限要素(3DFE)で構成される大規模なモデルが用いられるようになってきた。さらに、大地震時の安全性の検証に、非線形材料を適用した時刻歴応答解析も実施されている。特に原子力分野では、鉄筋コンクリート構造物を対象とした、3DFEモデルによる非線形解析が行われている。

時刻歴応答解析では、剛性や質量の他に減衰の設定が必要である。この減衰は、材料内部及び接合部等の摩擦による減衰を等価な粘性減衰として表現したものであり、初期減衰と呼ばれ弾性時から塑性時まで生じるものとしてモデル化される。塑性時は、これに加えて材料の塑性化に伴う減衰が弾塑性部材のモデル化によって明示的に考慮されることになる。

ところで、実際の構造物の初期減衰は、構造物の2次、3次モードの減衰比が、1次モードの減衰比と同程度か若干大きい程度と計測されており、振動数よりも振幅に依存性が観察されている。また、原子力施設の評価では、電気技術指針に示されているように、各部材のひずみエネルギーに基づき各モードの減衰比を一定とするひずみエネルギー比例型のモード減衰を用いて検討されている。このように、数値解析では振動数非依存性が重要となることから、工学的には、複数の主要なモードに対して過大あるいは過少とならないような、減衰モデルが望まれている。

ところが、大規模モデルでモード減衰を用いると減衰マトリクスが密行列となることで解析負荷が大きくなり、計算に膨大な時間を要してしまう。一方で、Rayleigh減衰を用いれば疎行列で解けるので計算負荷はかからないが、考慮したい振動数域の幅が広い場合には減衰比が振動数に依存してしまう恐れがある。

これらの問題点を克服するために、新たな減衰モデルが提案されている。特に、将来的な大規模3DFEモデルへの拡張性の観点から次の二つのモデルを本研究では取り上げた。一つは、中村が提案した、因果性に基づく減衰モデル(因果的履歴減衰及び拡張Rayleigh減衰)がである。規模の大きな3DFEモデルに対して現実的な解析時間で検討可能である。さらに、非線形問題に対しても、中村はBi-Linear型やTri-Linear型の非線形特性を有する質点系モデルにより、また、茂木らは材端弾塑性のフレームモデルによって適用できることを確認されている。もう一つは、

Huang らが提案されたモデルとして **Uniform** 減衰である。この減衰は、動的陽解法には極めて有効で、かなり幅広い振動数域で減衰比を一定とすることができるもののやや剛性を高く評価する傾向があることが指摘されている。

取り上げた減衰は、近年提案されたモデルのため、検討が十分ではなく、非線形問題における振動性状や、ランダム振動下での減衰モデルの影響について明確になっておらず、特に **3DFE** モデルにおいては検討がなされていない。今後、ますます材料非線形による詳細な大規模モデルで、時刻歴応答解析が実施されることが予測されることから、これに対応できる新たな減衰モデルの必要性が高まるものと予見される。

そこで本論では、今後期待される減衰モデルについて簡易なモデルにより、微小変形レベル下での、線形と非線形の振動性状について比較検討した。特に有用である因果性に基づく減衰モデルについて、鉄筋コンクリートの材料非線形を与えた **3DFE** モデルの適用性について、過去に実施された実験結果のシミュレーション解析を実施して新たに確認した。さらに実機モデルを想定した仮想原子力発電所の大規模 **3DFE** モデルを対象に、線形問題から非線形問題に対して地震応答解析を実施し、鉄筋コンクリートの動的な非線形解析における因果性に基づく減衰モデルの適用性と有用性について明らかにしている。

本論文は、全 6 章によって構成される。

第 1 章では、本論文の背景・目的と論文の構成について述べた。

第 2 章では、初めに、従来の減衰モデルと、近年提案された減衰モデル（因果性に基づく減衰と **Uniform** 減衰）を対象に概要を説明している。これらの減衰モデルの基本性状を把握するために、簡易なモデルを用いて比較検討している。線形問題では、減衰比や固有振動数の変化を確認し、非線形問題では、バイリニア型の復元力特性を有するモデルを対象に、最大塑性率や最大加速度応答を定量的に分析した。ここでは、非線形モード減衰を目標とする結果と位置づけ、その結果に対して、従来の減衰モデル及び近年の減衰モデルの結果を比較することで、減衰モデルとしての性能を明らかにした。また、解析時間の比較も行った。得られた結果としては簡易なモデルにおける線形及び非線形問題に対して、減衰比の精度や解析時間（安定性）の観点で、因果性に基づく減衰が、有力な減衰モデルであることを明らかにした。

第 3 章では、壁式構造を対象とした **FE** モデルに適用可能な、鉄筋コンクリート材料の非線形構成則の概要を説明している。また、解析の妥当性を示す目的で、過去に実施された動的加振試験の再現解析を実施した。この実験は、試験体が線形弾性時の状態から、壁が破壊するまでの強非線形時の状態まで加振されている。ここで初めて、鉄筋コンクリート材料の非線形構成則を与えた **3DFE** モデルに対して、因果性に基づく減衰モデルを適用し非線形解析を実施した。因果性に基づく減衰モデルの解析結果と実験結果と比較することで、減衰モデルの適用性と妥当性を示した。また、減衰マトリクスの作成時において剛性マトリクスを初期型と瞬間型で比較し、どの程度応答に影響を及ぼしているか確認し、その結果について論じた。この結果では、良好に実験結果を再現できていることと、減衰マトリクスの作成時において剛性マトリクスを瞬間型にすることによって、実験結果や初期型の解析結果よりも構造物がより損傷している結果が確認された。本結果と既往の知見を勘案して、建屋の構造的な健全性を評価する場合においては、瞬間型を採用することが推奨される。ただし、初期型においても良好に実験結果を再現できていることから、初期型を用いる場合は瞬間型よりも応答が過少に評価されることについて留意する必要がある。

あると結論付けた。

第4章では、仮想原子力発電所を模擬した、節点数が2400程度のFEモデルを作成し、地震動を3方向に入力し線形の動的解析を実施している。モード減衰、因果性に基づく減衰及びRayleigh減衰を対象に、最大変位分布、最大加速度分布及び加速度応答スペクトルの結果を比較している。ここでも2章と同様に、モード減衰を目標とする結果とした。因果性に基づく減衰が、従来の減衰に対して、規模の大きな3DFEモデルを対象としても、減衰モデルの性能や計算時間に対して、十分な実用性を有していることを明らかにした。特に、因果性に基づく減衰モデルが、モード減衰と最も良好に対応しており、適切な減衰比で評価されていることを確認した。また計算時間は、モード減衰が最も遅く、因果性に基づく減衰については、従来のRayleigh減衰とほぼ同等であった。非線形の問題や更に大きな解析モデルを扱う場合では、モード減衰では現実的な時間で検討することが不可能に近いことが分かった。因果性に基づく減衰は、大規模モデルを対象としても、減衰モデルの性能や計算時間に対して、十分な実用性を有する減衰モデルであることが明らかとなった。

第5章では、鉄筋コンクリートの非線形解析で精度を有する結果を得るために、4章の3DFEモデルのメッシュを細かく分割し、節点数が21000程度の大規模FEモデルを作成し検討した。この規模では、モード減衰で検討できないので、目標とする結果が無く検証が困難であるが、2章から4章までに得られた結果を踏まえて、建屋の全体的な応答の傾向から、妥当な結果を判断し、因果性に基づく減衰が、従来のRayleigh減衰に比べて適切な減衰で評価できていることを明らかにした。線形や弱非線形レベルでは、4章の線形とほとんど同じ傾向であった。非線形レベルが強くなると、初期減衰よりも損傷による履歴エネルギー吸収による履歴減衰が支配的になることが2章の結果により把握されており、5章の結果においても、線形時や非線形レベルが弱い時と比べて、強非線形レベルでは履歴減衰の影響により各減衰モデルによる応答の差が小さくなっていることを鉄筋の軸ひずみや加速度応答スペクトルにより確認された。3章と同様に、瞬間型の方が初期型に比べて応答が大きくなっており、瞬間型は構造の健全性評価においては保守性のある手法であった。また、非線形解析時における計算時間についてもそれぞれの減衰モデルで比較を行った。非線形問題の計算時間は、線形解法や非線形の処理の時間が支配的であるため、因果性に基づく減衰と従来のRayleigh減衰で違いがほとんどなかった。さらに、領域分割法と反復法を用いることで計算速度を向上させることが可能であるとともに、因果性に基づく減衰に対しても何ら特別な操作を行うことなく、領域分割法に基づく並列計算に適用できることを確認した。

第6章では、総括的な結論を示した。2章から5章の検証により、因果性に基づく減衰モデルは、工学的な観点で、減衰の性能として精度が高いことと、従来のRayleigh減衰と同様な計算効率の高さを有しており、今後想定される大規模FEモデルにおいて有用性のある減衰モデルであることが、本研究によって証明された。