

題目 大規模 3次元弾塑性骨組解析に適した減衰モデルに関する研究
(STUDY ON A DAMPING MODEL SUITABLE FOR INELASTIC RESPONSE HISTORY ANALYSIS OF LARGE-SCALE 3D MOMENT-FRAME)

近年、超高層建築物や重要度の高い建築物を制振構造とすることが一般的となり、このような構造形式では制振部材の性能を正しく評価することが構造設計上重要となってきた。そのため、制振部材を部材系振動モデルに組み込んだ精緻な地震シミュレーションによって評価するケースが増えてきた。本研究の目的は、このような大規模 3次元弾塑性地震応答解析で利便性/実用性に優れた減衰のモデル化方法を洞察することである。

超高層ビルの建設が本格化した 1960 年代ころは、まだ計算機の処理能力が現在より遥かに劣っていたため、地震応答解析の振動モデルには質点系振動モデルを用いていた。しかし 90 年代以降は計算機の処理能力が大幅に向上したことで、部材系振動モデルを用いるケースも増えてきた。その歴史の中で、時刻歴応答解析の減衰モデルには古くから剛性比例型減衰が用いられてきた。剛性比例型減衰はプログラムへの組み込みが容易な上に、弾塑性解析でも安定した解が得られる扱いやすい減衰モデルである。振動数に比例して減衰比が上昇するモデルであるが、検討の対象が主に水平動に限定されていたこと、及び振動モデルが小規模であったため、高次モードの影響がそれほど大きくなかったことが広く使われてきた背景にある。しかし、近年普及した解析モデルの大規模化・精緻化は、これまで潜在的にはあったものの、具体的に表に現れることが少なかった粘性減衰の振動数依存性の問題を顕在化させた。本論文ではまず 1 章で、本研究の動機となった大規模弾塑性応答履歴解析における振動数非依存減衰の必要性について論じる。次に 2 章で粘性減衰の振動数依存性に起因した様々な問題、および減衰力の不自然な挙動（例えば、瞬間 Rayleigh 減衰力の不連続性）に関して、既往の研究の成果と限界について言及する。

3 章以降は既往の減衰モデルの限界を克服するための試みとして、3 つの減衰モデルに着目する。3 章では 1 つ目の減衰モデルとして、剛性比例減衰の減衰力に頭打ちを設定することで、簡易的に振動数非依存性を実現する「キャップ減衰」と呼ばれる減衰モデルに着目する。このモデルのコンセプトはシンプルであるが、計算負荷も少ない上に理論も単純明快であるため、実用性に優れた減衰モデルである。しかし原著論文では減衰力の頭打ち量をどのように設定すればよいか明確な定義がなく、その設定量は設計者の裁量に任せられていた。そこで本論文では部材復元力の直近の最大値に依存した頭打ち量を採用する手法を提案した。これにより、設計者の判断に依存せずにモデル化することが可能となる。その効果を鉄骨と鉄筋コンクリートからなる 20 階建ての魚骨モデルを用いて既存モデルに対する優位性を検証した。その結果、提案モデルは既存モデルに比べて良好に振動数に鈍感な挙動を示すことを明らかにし、また、質量項の減衰を持たないため、滑動・浮き上がり・免震構造などのような剛体運動を伴う地震シミュレーションに有効であることを示した。4 章では 2 つ目の減衰モデルとして、広い振動数範囲にわたって振動数に依存しないエネルギー逸散を実現できる「拡張 Rayleigh 減衰」と呼ばれる減衰モデルに着目する。拡張 Rayleigh 減衰は Rayleigh 減衰の剛性項を因果減衰に置き換えた減衰モデルであり、これにより Rayleigh 減衰よりも減衰比一定域を拡張することを可能にしている。しかし当減衰モデルを実用化す

るためには、プログラムへの実装方法など数学理論以外の問題を解決する必要があり、本論文ではその実例を示している。更にこの検討では、多質点系モデルを用いて、想定される振動数範囲における拡張 Rayleigh 減衰の基本的な減衰性能の評価を行い、次に 12 階建ての 3 次元弾性骨組モデルを用いて、実務的な部材系モデルを用いて減衰性能を検証した。その結果、拡張 Rayleigh 減衰は Rayleigh 減衰よりも広い振動数範囲で振動数に依存せず、モード減衰よりも計算負荷が低いことが示された。5 章では 3 つめの減衰モデルとして「一様減衰」と呼ばれる減衰モデルに着目する。非常に幅広い振動数域で振動数非依存性を実現でき、計算付加も少ないことが報告されているが、公開情報が少ないためその実用性は未知数であった。そこでその性能を客観的に評価するため、減衰モデルを実際にプログラムに実装して実用性を検証する。また 3 章から続くこれらの減衰モデル（キャップ減衰、拡張 Rayleigh、一様減衰）の減衰性能を洞察するため、古典的な減衰モデル Rayleigh 減衰、モード減衰とともに、35 階建て 2 次元平面モデルの水平/鉛直動同時入力による検討例を通じてその実用性を検討した。その結果、水平変位及び鉛直変位応答を評価する目的であれば、水平 1 次から鉛直 1 次モードまでの振動数範囲に対して振動数非依存性を考慮できれば、概ね良好な解が得られることを明らかにし、このような検討では拡張 Rayleigh 減衰が良いパフォーマンスを発揮することを示した。しかし同時に水平加速度と鉛直加速度を同時に評価する必要がある場合には不十分であることを示した。その他、キャップ減衰及び一様減衰の利点と限界を示した。6 章の本論文のまとめには将来の展望として、実際に実務設計で生じる具体的な検討事例別に、これら減衰モデル（キャップ減衰、拡張 Rayleigh、一様減衰）を活用することの合理性を例示した。