

氏名	しら い かず たか 白 井 和 貴
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成22年9月8日
学位授与の根拠法規	学位規則第4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) 都市・建築学専攻
学位論文題目	履歴型ダンパー付き RC 造架構の複素剛性モデルによる 等価線形地震応答制御設計法
指導教員	東北大学教授 井上 範夫
論文審査委員	主査 東北大学教授 井上 範夫 東北大学教授 源栄 正人 東北大学教授 植松 康 東北大学准教授 五十子 幸樹

論文内容要旨

第1章 序論

わが国の建物の耐震工学は、過去の地震被害の教訓や、研究成果の蓄積により発展を遂げてきた。近年では、1995年阪神淡路大震災を契機により高い耐震性を求める社会的要求が強まり、さらに入力地震動の強化、建物の長寿命化、既存建物の補強必要性、自由度の高い建物空間と開放的プランの要望などの社会背景・ニーズを受け、鉄筋コンクリート(RC)造建物の架構内に履歴型ダンパーを設置するRC制振構造の実施例が新築および既存建物補強ともに徐々に増加している。

RC制振構造の設計においてはパッシブ制振の特徴を適切に考慮した設計が肝要であるが、現状は設計者が経験的・試行錯誤的にダンパー諸元を決定することが多い。このためRC制振構造の特性を考慮し潜在性能を最大限に引き出すことが可能な、合理的な制振設計・評価手法が必要とされている。そこで本論では、履歴型ダンパーを有するRC造架構を対象として下記(1)(2)を目的とする検討を行った。

(1) ダンパーの最適パラメータの評価手法の提案

(2) 最小の支持部材・ダンパー剛性により地震応答を目標塑性率に収める、合理的な地震応答制御設計法の提案

第2章 履歴型ダンパー付き RC 造架構の複素剛性モデル化

履歴型ダンパー付き RC 造架構を表すモデルとして、2つの複素ばねと支持部材ばねを有する等価線形複素剛性モデルを提案した(図2-1, 図2-2)。また、提案モデルによる等価線形周波数地震応答解析を行い、非線形時刻歴解析との比較により、提案モデルが架構およびダンパーの最大変形を概略評価できることを確認した(図2-3, 図2-4)。なお提案モデルの特長として、等価線形化により伝達関数に基づいて最適ダンパー解を検討可能となること、2つの複素ばねで表現することで強い非線形性と履歴減衰性状を有する複合履歴系を簡潔に表現できること、が挙げられる。

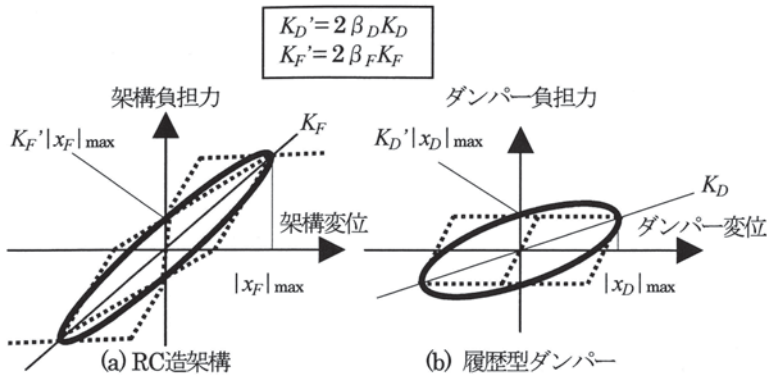


図 2-1 架構とダンパーの等価線形化

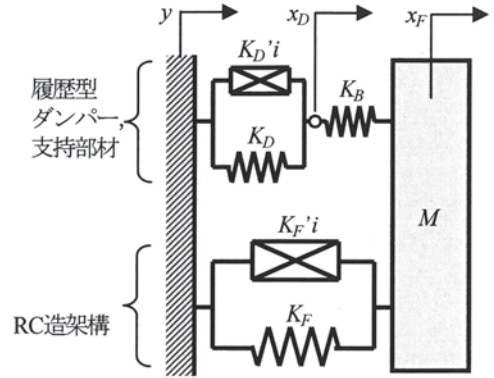


図 2-2 複素剛性モデル

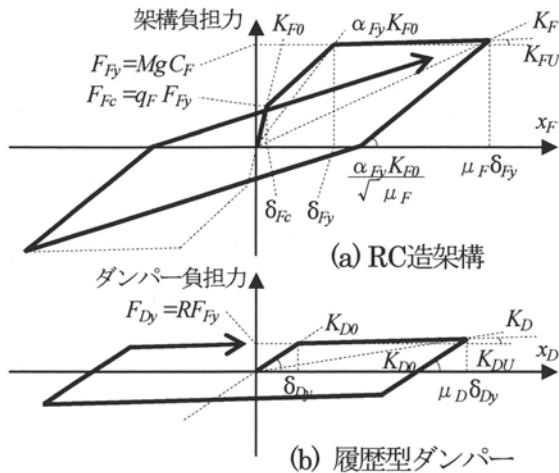


図 2-3 架構とダンパーの復元力特性

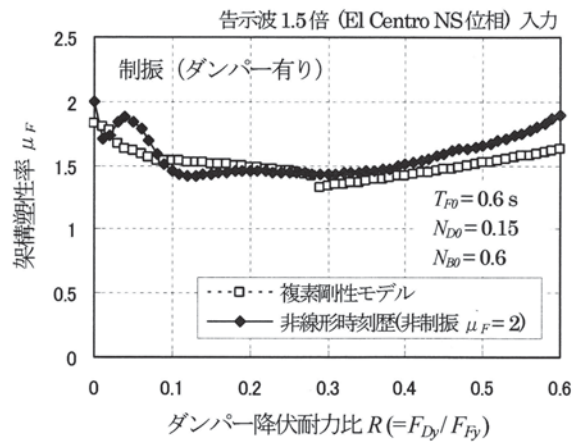


図 2-4 解析結果の最大応答の比較

第3章 最適ダンパー降伏耐力の算定

等価線形系の伝達関数に基づいてダンパーの最適な降伏耐力を評価する手法を検討し、簡便なダンパー降伏耐力算定式を提案した。まず、伝達関数の H_∞ ノルム(ピーク振幅)と重み付き H_2 ノルム(地動周波数特性を考慮した2乗平均平方根)を最小化するダンパー降伏耐力の最適解をそれぞれ求めた(図 3-1~図 3-3)。次に、比較のため非線形時刻歴応答解析を行い、その結果を反映して等価線形系伝達関数における塑性率を非線形性を考慮して補正

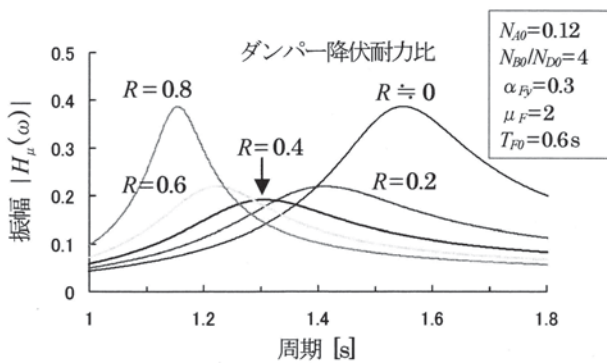


図 3-1 等価線形系伝達関数 $|H_\mu(\omega)|$

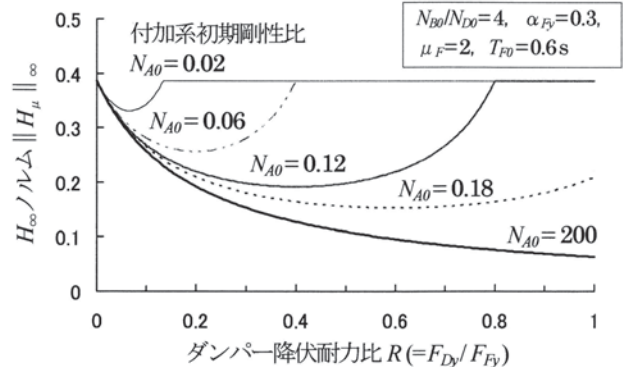


図 3-2 H_∞ ノルム $\|H_\mu\|_\infty$ - ダンパー降伏耐力比 R 関係

する方法を提示した。さらに、告示スペクトル適合波（解放工学的基盤）を想定する場合の簡便な最適ダンパー降伏耐力の算定式を提案し(式 3-1, 式 3-2), その妥当性を確認した(図 3-4)。加えて、軟弱地盤におけるスペクトルを想定して最適ダンパー性状を検討し、軟弱地盤の影響に留意する必要があることを示した。このように RC 制振構造の最適設計問題を等価線形系の伝達関数に着目して検討した点が本研究の特徴として挙げられる。

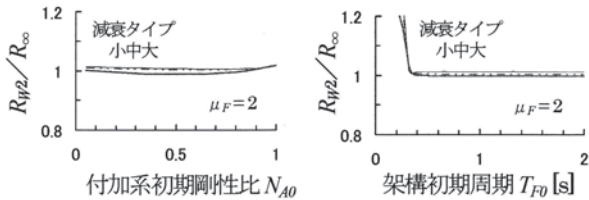


図 3-3 H_{∞} ノルムと重み付き H_2 ノルムを最小化するダンパー耐力比 R_{∞} と R_{W2} の比較

$$R_{\eta_{EVA}} = \eta_{EVA}^2 (R_{(\mu_D=1)} / 2) = \eta_{EVA}^2 \mu_F \frac{N_{A0}}{2\alpha_{Fy}} \quad (式 3-1)$$

$$\eta_{EVA} = \left(1 - \frac{0.2N_{A0}\mu_F}{\alpha_{Fy}} \right) \sqrt{\frac{0.25 + 0.75\mu_F}{\mu_F}} \quad (式 3-2)$$

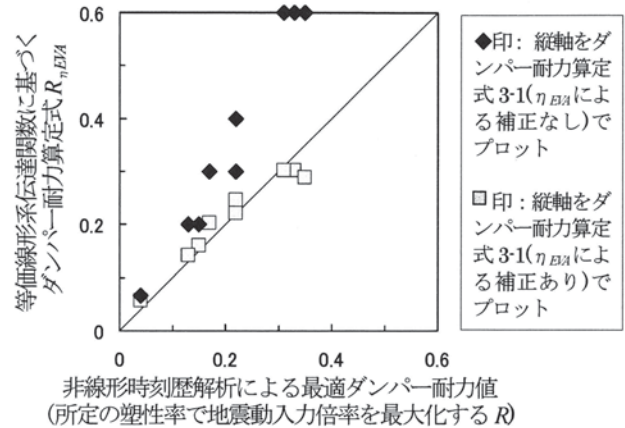


図 3-4 提案する最適ダンパー降伏耐力算定式の検証

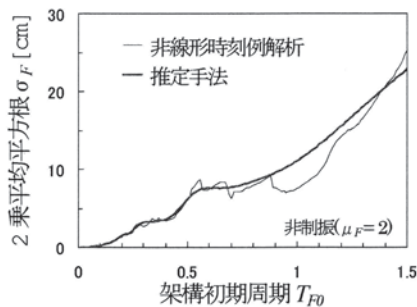
第 4 章 不規則振動論の準用による非線形地震応答推定

不規則振動論に基づく非線形地震応答の推定手法を提示した。本推定手法により、架構応答変位の 2 乗平均平方根、ピークファクター、最大変位をそれぞれ算定し、非線形時刻歴解析による計算値との比較により提案手法の妥当性を確認した(図 4-1)。本推定手法は、既往の線形理論を準用し、非定常・非線形範囲への拡張を試みたものであり、非線形性を考慮し塑性率と等価周期を補正することを特徴としている(式 4-1~式 4-3)。なお不規則振動論により応答推定を行う利点として、非線形時刻歴解析と比較してより一般性が高い解が得られること、応答スペクトルを用いる方法と比較して入力地震動の継続時間を陽な形で考慮できること、さらに伝達関数に基づく最適ダンパー評価手法との連続性が高いことが挙げられる。

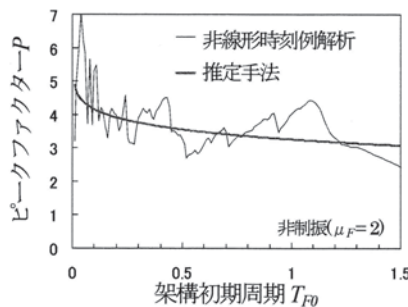
$$\sigma_F = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} |H_{\mu}(\omega)|^2 G_I(\omega) d\omega} \quad (式 4-1)$$

$$P = 1.2 \sqrt{2 \ln(2t_d / T_{eq})} \quad (式 4-2)$$

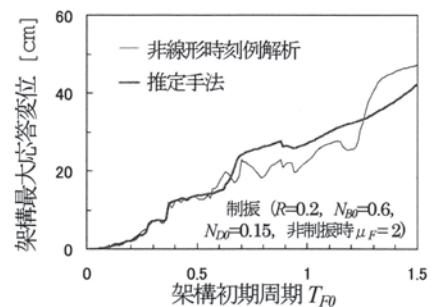
$$T_{eq} = \eta_{EVA} T_{\mu} = \frac{T_{F0}}{\sqrt{1 + N_{A0}}} \sqrt{\frac{\eta_{EVA}^2 \mu_F}{\alpha_{Fy}}} \quad (式 4-3)$$



(a) 2 乗平均平方根



(b) ピークファクター



(c) 架構最大応答変位

図 4-1 推定手法と非線形時刻歴解析の比較 (告示波 1.5 倍 El Centro NS 位相入力)

第5章 最適ダンパーを考慮した地震応答制御設計法

最小の支持部材・ダンパー初期剛性によって地震時の最大応答変形を目標塑性率に収める、合理的で最適な制振設計手法を提案した(図5-1)。また、1層モデルおよび多層モデルに対する制振設計を行い、非線形時刻歴解析により提案手法の妥当性を確認した(図5-2)。なお本制振設計手法は、第2～4章の内容を有機的に複合し、部分最適化を含む全体最適化の構造をもつフローとなっていることが特徴といえる。

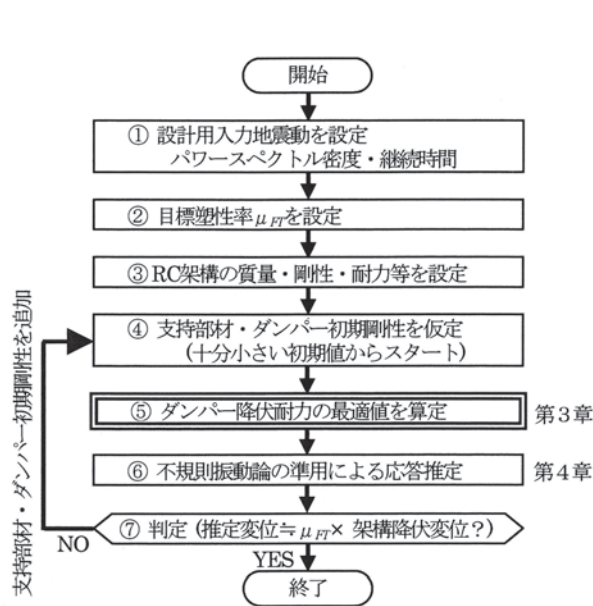


図5-1 制振設計フロー

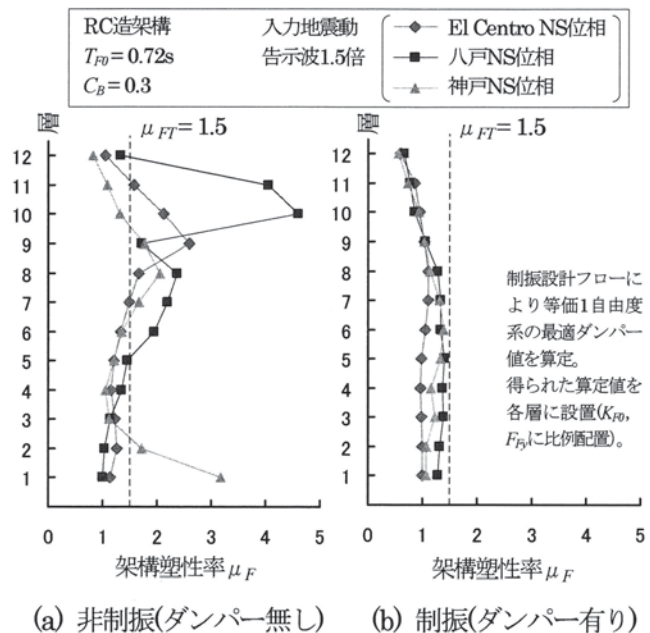


図5-2 多層モデルの非線形時刻歴解析結果

第6章 結論

本研究では、履歴型ダンパー付き RC 造架構の合理的な地震応答制御手法について検討し、以下の知見を得た。

- 1) 履歴型ダンパー付き RC 造架構の特性を簡潔に表現するため、等価線形複素剛性モデルを提案した。
- 2) 等価線形系伝達関数に基づく最適なダンパー耐力の評価手法を示し、簡便なダンパー耐力算定式を提案した。
- 3) 不規則振動論を準用し、非線形性を考慮して補正する地震応答推定手法を提示した。
- 4) 最小の支持部材・ダンパー剛性で地震応答を目標塑性率に収める、合理的な制振設計法を提案した。

以上より、強い非線形性を有する複合履歴系である RC パッシブ制振構造に対して、合理的で最適な地震応答制御設計が実現可能であることを明らかにした。本論で示した手法と得られた知見は、今後の更なる応用・展開が期待できると考えられる。今後の課題として、i) 建物と地盤の相互作用による影響の検討、ii) 高さ方向の理論的な最適ダンパー配置と高次モードの影響の検討、iii) ダンパーの累積塑性応答の評価手法の検討、iv) 応答推定精度の更なる向上、が挙げられる。

論文審査結果の要旨

阪神淡路大震災を契機に、建物に対してより高い耐震性を求める社会的要求が強まり、地震時の建物の損傷を制御する制振構造が多く採用されるようになった。本論文では、鉄筋コンクリート構造建物を対象として、その架構内に履歴型ダンパーを設置して応答低減を行う設計を行うために、ダンパーの最適パラメータの評価法と合理的な地震応答制御設計法の提案を行い、地震応答解析を行ってその有効性を示したもので、全6章よりなっている。

第1章は序論である。

第2章では、履歴型ダンパー付き鉄筋コンクリート造架構を表すモデルとして、2つの複素ばねと支持部材ばねを有する等価線形複素剛性モデルを提案し、このモデルによる等価線形周波数地震応答解析を行って、非線形時刻歴解析との比較により、提案モデルが架構およびダンパーの最大変形を概略評価できることを示している。

第3章では、まず、等価線形系の伝達関数に基づいてダンパーの最適な降伏耐力を評価し、さらに、非線形時刻歴応答解析を行った結果に基づき、非線形の影響を考慮してこの耐力式を塑性率によって補正する方法を提示している。また、その妥当性を、耐震設計で一般に用いられている告示スペクトル適合波（解放工学的基盤）を想定する場合に適用し、この提案式の妥当性を明らかにしている。さらに、軟弱地盤におけるスペクトルを想定した最適ダンパー性状の検討も行い、軟弱地盤の影響に留意する必要性があることも指摘している。

第4章では、不規則振動論に基づく非線形地震応答の推定手法を提示し、架構応答変位の2乗平均平方根、ピークファクター、最大変位をそれぞれ算定している。さらに、非線形時刻歴解析による計算値との比較によりこの提案手法の妥当性を示している。この推定手法は、既往の線形理論を準用し、非定常・非線形範囲への拡張を試みたものであり、非線形性を考慮して塑性率と等価周期を補正することを特徴としている。

第5章では、第2から第4章の内容を有機的に複合し、部分最適化を含む全体最適化の構造をもつフローを用いて、最小の支持部材・ダンパー初期剛性によって地震時の最大応答変形を目標塑性率に収める、合理的で最適な制振設計手法を提案している。この妥当性については、1層モデルおよび多層モデルに対する制振設計を行って、非線形時刻歴解析との比較により明らかにしている。

第6章は結論である。

以上を要するに、本論文は、履歴型ダンパー付き鉄筋コンクリート造架構の合理的な地震応答制御手法を提示して、地震応答解析との比較によりその有効性を示すものであり、鉄筋コンクリート造建物の地震時安全性を向上させることに寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。