

平成 26 年 5 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760441

研究課題名(和文)建物と地盤の動的相互作用を考慮したRC制振構造の最適ダンパー特性の解明

研究課題名(英文)Elucidation of the optimum damper characteristics for RC passive control structures in consideration of soil-structure interactions

研究代表者

白井 和貴 (SHIRAI, Kazutaka)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20610968

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：建物と地盤の動的相互作用(SSI)を考慮した鉄筋コンクリート造パッシブ制振構造を対象として、地震時の制振効果を最大化する最適ダンパー特性について、時刻歴地震応答解析による解析的検討、伝達関数に基づく理論的検討、および振動台を用いた実験的検討を実施した。この結果、SSI効果を考慮すると、基礎固定時と比べて最適ダンパー特性が大きく変化する場合があることが示された。また、伝達関数の重み付きH2ノルム(2乗平均平方根)に基づく最適ダンパー特性の評価方法の妥当性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In order to elucidate the optimum damper characteristics for reinforced concrete passive control structures in consideration of soil-structure interactions (SSI), analytical studies based on time history earthquake response analyses, a theoretical study based on the transfer function, and an experimental study using a shake table were conducted. The results showed that the optimum damper characteristics have the potential to vary compared to fixed base conditions due to SSI effects. Moreover, the adequacy of the evaluation method of the optimum damper characteristics using the weighted H2 norm (root mean square) of the transfer function was confirmed.

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：制振構造 地震応答 最適制御設計 最適ダンパー 建物地盤動的相互作用 非線形応答 伝達関数
振動台実験

1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート造（RC）建物の主架構内に履歴型ダンパー等を設置するパッシブ制振構造の適用例が増加しており、新築・既存建物の耐震性を向上する有効な選択肢として位置付けられる。RC制振建物の設計においてはパッシブ制振の特徴を適切に考慮することが肝要であるが、現状では設計者が経験的・試行錯誤的にダンパー諸元を決定することが多い。そのため、制振構造の特性を反映し潜在能力を最大限に引き出すことを可能にする合理的な設計・評価方法の確立が求められている。ここで注目すべきは、地盤の影響、特に建物と地盤の動的相互作用（SSI）の存在である。中低層 RC 建物では SSI が地震時の建物応答に大きな影響を及ぼすことが以前から指摘されており、RC 制振構造の性能を評価するうえで SSI の影響を適切に考慮することは極めて重要である。しかし、SSI の影響を考慮した RC 制振建物の最適ダンパーの理論解や実験的検証に関する既往研究は、国内・国外ともに見当たらずほぼ皆無に等しいのが現状である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、層間ダンパーを有する RC パッシブ制振構造を対象として、SSI を考慮した強震時の制振効果を最大化する最適なダンパー特性を明らかにすることである。具体的目標として、[1]ダンパーを有する上部構造+スウェイ・ロッキング（SR）地盤のモデルを対象に地盤の硬軟が最適ダンパー特性に及ぼす影響を理論的に検討すること、[2]制振構造と SR 地盤を模擬した模型試験体の振動台加振実験を行い最適ダンパー理論の妥当性を検証すること、が挙げられる。これらより、試行錯誤的な時刻歴地震応答解析に依らずに効率的なダンパー解を理論的かつ簡易に評価する方法を開発することが最終的な成果目標である。

3. 研究の方法

(1) 理論的・解析的検討

Maxwell ダンパー（ダッシュポットと線形ばねの直列要素）を有する SR モデルと基礎固定モデルを対象として、最適ダンパー減衰比に着目した理論的・解析的検討を行った。理論的検討では、伝達関数の重み付き H2 ノルム（2乗平均平方根）を評価指標とし、それを最小化するダンパー減衰比の特性について評価した。解析的検討では、時刻歴地震応答解析による最大応答値を最小化するダンパー減衰比の特性について評価した。また、ダンパーが摩擦ダンパーの場合についても同様の解析的検討を行った。

(2) 実験的検討

地盤の SR 挙動を模擬し主架構内に摩擦ダンパーを有するパッシブ制振構造の模型試験体に対する振動台実験を計画・実施した。

摩擦ダンパーの滑り耐力と地震動の入力レベルをパラメトリックに変化させた多数回の加振を行い、地震時の最大応答を最小化する最適ダンパー特性について実験的に検討した。

4. 研究成果

(1) 理論的・解析的検討

理論的検討として、伝達関数に基づく評価を行った。検討対象として、第2種地盤上の杭基礎の中層パッシブ制振建物を想定し、図1に示す Maxwell ダンパーを有する等価な1質点基礎固定（FIX）モデルと等価な SR モデルを用いた。SR モデルの地盤ばねは、参考文献1)の SSI を考慮した RC 造集合住宅の設計例（6階建て、長辺方向、ラーメン構造、杭基礎、第2種地盤、詳細法 CASE-1）を参照して設定した。伝達関数には、図1の各モデルが定常正弦地動を受ける場合の応答絶対加速度振幅の入力加速度振幅に対する比、応答層間変位振幅の入力変位振幅に対する比をそれぞれ用いた。最適ダンパー特性の評価指標として、参考文献2)の重み関数（告示スペクトルに対応）により地動スペクトル性状を考慮した重み付き H2 ノルムを用い、それを最小化するダンパー減衰比を最適ダンパー減衰比 h_{Dopt} とした。図2、3に伝達関数に基づく h_{Dopt} と主架構固有周期 T_F の関係を示す。FIX と比べて SR の方が大きい h_{Dopt} の値を示す傾向がみられた。また、 T_F が短いほど FIX と SR で h_{Dopt} の差異が拡大する傾向を示した。この要因として、 T_F が短くなると主架構の剛性が高く（すなわち主架構に対して地盤が相対的に軟らかく）なるため地盤の影響が大きく出たことが挙げられる。

解析的検討として、上述の理論的検討と同様のモデルを用いて、時刻歴地震応答解析に基づく評価を行った。入力地震波は告示波（極稀、基盤、乱数位相、入力倍率 1.5、継続時間 L、M、S 各 5 波）を用いた。地震波 L、M、S の各 5 波について最大応答（絶対加速度、層間変位）の平均値をそれぞれ最小化するダンパー減衰比を最適ダンパー減衰比 h_{Dopt} とした。 $h_{Dopt}-T_F$ 関係を図2、3に重ねて示す。時刻歴地震応答解析による評価結果は、伝達関数に基づく評価結果と概ね良く対応した。このことから、伝達関数に基づく最適ダンパー特性の評価方法の妥当性を確認した。なお、ダンパーが摩擦ダンパーの場合についても同様の解析的評価を実施した。

参考文献 1)

日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計、2006、205-240
参考文献 2)

白井和貴、蔭山満、五十子幸樹、井上範夫：履歴型ダンパーを有する鉄筋コンクリート造架構の等価線形系伝達関数に基づく最適ダンパー降伏耐力に関する研究、日本建築学会構造系論文集、(666)、2011、1433-1442

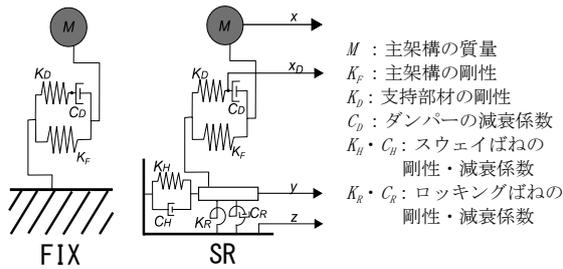


図1 検討対象モデル

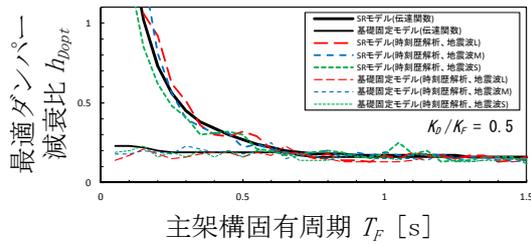


図2 応答絶対加速度に関する最適ダンパー減衰比 (理論的評価と解析的評価の比較)

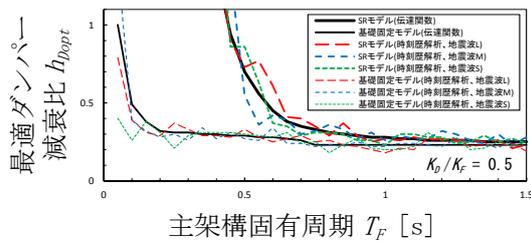


図3 応答層間変位に関する最適ダンパー減衰比 (理論的評価と解析的評価の比較)

(2) 実験的検討

試験体として、SR機構を基礎下部に有する摩擦ダンパー付き1層パッシブ制振構造模型(図4)を設計・製作した。試験体の主架構とSR機構の設計にあたり、前述の参考文献1)のSSIを考慮したRC造集合住宅の設計例の上部構造(降伏時等価剛性)と地盤SRばねの諸元を参考にした。主架構は、柱部材(ステンレス製板ばね)とその上下に剛梁部材を配置して構成した。SR機構は、スウェイ部にリニアガイドと水平方向引張コイルばね、ロッキング部にピン部材と上下方向圧縮コイルばねを配置して構築した。SR機構には、SRばねの減衰に相当する粘性減衰を小型オイルダンパーを配置して付与した。主架構の層間には、支持部材(ステンレス製板ばね)を介して摩擦ダンパーを設置した。摩擦ダンパーは、導入圧接力をゴムバンドの巻き付けパターンにより調整する方式とした(図5)。ゴムバンドの径・本数・巻き方の多数の組み合わせパターンについて、事前にばねばかりを用いた予備計測を実施し、意図する摩擦ダンパーの滑り耐力を実現できるように工夫した。入力地震波は模擬地震波(告示スペクトル適合波、乱數位相)を用いた。ただし、上部構造の固有周期と目標応答スペクトル

の折れ点周期の比率が実大スケール(設計例)と試験体とで一致するように配慮した。主たる実験パラメータは、SSI条件、摩擦ダンパーの滑り耐力、入力地震動の位相、入力レベルとした。計300回以上の加振を行った。

図6、7に実験結果から得られた摩擦ダンパーの滑り耐力と最大応答値の関係を示す。試験体上部構造頂部の最大加速度(図6)については、地震波の入力倍率が上がるにつれて最適ダンパー値は概ね大きくなった。また、SRの方がFIXよりも最適ダンパー値が若干大きい値を示す傾向が見受けられた。なお、最適ダンパー値における最大加速度はFIXよりもSRの方がやや小さい値を示した。試験体

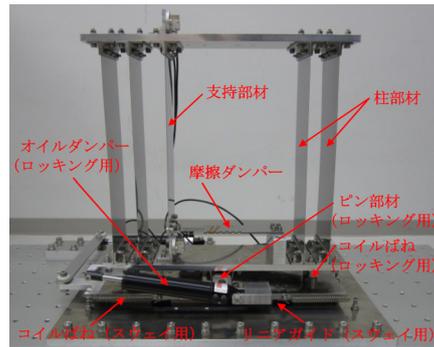


図4 試験体概観(立観)

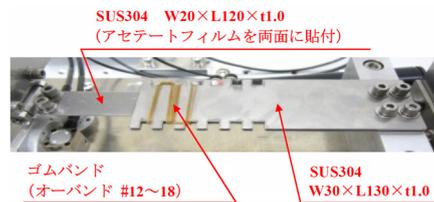


図5 実験で採用した摩擦ダンパー

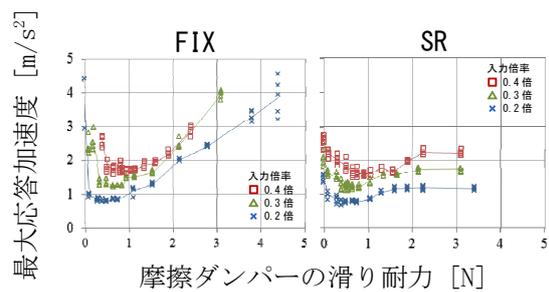


図6 振動台実験結果(最大応答加速度)

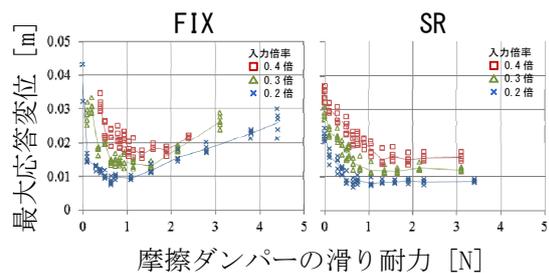


図7 振動台実験結果(最大応答層間変位)

上部構造の最大層間変位(図7)については、FIXでは最適ダンパー値が極小値として現れているが、SRでは、ダンパー滑り耐力が大きくなると最大層間変位がほぼ一定値に収束し、最適ダンパー値が極小値としては現れない傾向が認められた。

(3)まとめ

SSIを考慮したパッシブ制振構造の最適ダンパー特性について、伝達関数に基づく理論的検討、時刻歴地震応答解析による解析的検討、振動台を用いた実験的検討を実施した。得られた知見を以下にまとめる。

- ① SSIを考慮すると、基礎固定時と比べて最適ダンパー値に大きな違いが生じる場合があり、その差異は建物の剛性が地盤に対して相対的に高くなるほど拡大した。
- ② 伝達関数の重み付きH2ノルムに基づく最適ダンパー特性の評価方法の妥当性を確認した。この評価方法は、試行錯誤的な時刻歴地震応答解析に依らない簡便な手法として有用といえる。
- ③ SSI効果を模擬したパッシブ制振構造の振動台実験では、簡易ながら滑り耐力を自在に設定可能な摩擦ダンパー付き試験体の採用により、多数の加振ケースを効率的に実施できた。実験の結果、SSI効果を考慮することで最適ダンパー特性に違いが生じることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① Kazutaka SHIRAI, Norio INOUE: A seismic response estimation method for RC structures using random vibration theory, Journal of Advanced Concrete Technology, 査読有, 12(2), 2014, 62-72
DOI: 10.3151/jact.12.62

〔学会発表〕(計7件)

- ① 白井和貴、永岡灯、古家知典、藤森健史、菊地優：建物地盤動的相互作用を考慮したパッシブ制振構造の最適ダンパー特性に関する実験的研究 その1 試験体の設計、日本建築学会大会学術講演梗概集、2014年9月12日～14日、神戸大学(神戸市)
- ② 永岡灯、白井和貴、藤森健史、菊地優：建物地盤動的相互作用を考慮したパッシブ制振構造の最適ダンパー特性に関する実験的研究 その2 振動台実験の方法と結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、2014年9月12日～14日、神戸大学(神戸市)
- ③ 古家知典、白井和貴、藤森健史、石井建、菊地優：建物地盤動的相互作用を考慮した履歴ダンパーを有する制振構造の最適ダンパー特性評価、日本建築学会大会学

術講演梗概集、2014年9月12日～14日、神戸大学(神戸市)

- ④ 永岡灯、白井和貴、古家知典、藤森健史、菊地優：建物地盤動的相互作用を考慮した摩擦ダンパー付き制振構造の最適ダンパー特性に関する実験的研究、日本建築学会北海道支部研究報告集、2014年6月28日、釧路工業高等専門学校(釧路市)
- ⑤ Kazutaka SHIRAI, Mitsuru KAGEYAMA, Kohju IKAGO, Norio INOUE: Optimum yield strength of a hysteretic damper incorporated into RC structures using the transfer function of an equivalent linear system, 13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures (13WCSI), 24-25 September 2013, Tohoku University (Sendai, Japan)
- ⑥ 古家知典、白井和貴、藤森健史、菊地優：建物地盤動的相互作用を考慮したMaxwell型ダンパーを有する制振構造の最適減衰特性評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、2013年8月30日～9月1日、北海道大学(札幌市)
- ⑦ 古家知典、白井和貴、藤森健史、菊地優：地盤のスウェイ・ロッキング挙動を考慮したMaxwellダンパー付きパッシブ制振構造の最適ダンパー特性、日本建築学会北海道支部研究報告集、2013年6月29日、北海道工業大学(札幌市)

〔図書〕(計0件)

なし

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

なし

○取得状況(計0件)

なし

〔その他〕

ホームページ等

<http://ariel-as.eng.hokudai.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

白井 和貴 (SHIRAI, Kazutaka)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20610968

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし