

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	免震層の非線形性を考慮したアクティブ制御系の等価モデルの構築と設計手法 その2: 等価モデルの精度検証および応答スペクトルを用いた設計手法の提案
Title(English)	Design method for active base isolation with nonlinear component Part 2: Verification of accuracy of equivalence model and design method using response spectrum
著者(和文)	陳引力, 佐藤大樹, 宮本皓, 余錦華
Authors(English)	Yinli Chen, Daiki Sato, Kou Miyamoto, Jinhua She
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , , pp. 547-548
Citation(English)	, , , pp. 547-548
発行日 / Pub. date	2021, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

免震層の非線形性を考慮したアクティブ制御系の等価モデルの構築と設計手法
その2：等価モデルの精度検証および応答スペクトルを用いた設計手法の提案

アクティブ制御 免震構造 応答スペクトル
LQR 最適制御 非線形系

正会員 ○陳 引力*^{1,2} 同 佐藤大樹*³
同 宮本 皓*⁴ 同 余 錦華*⁵

1. はじめに

本報その2では、その1で提案した等価線形化モデルの精度検証を行うと同時に、応答スペクトルを用いたアクティブ制御系の設計手法の適用を行う。

2. 制御有りの場合の等価モデルの精度検証

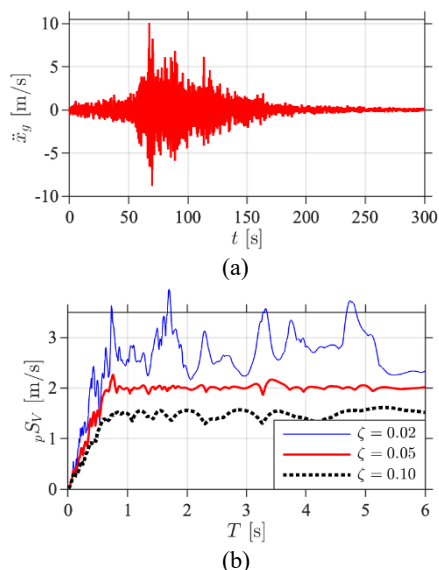


Fig. 3 Art Hachinohe 200 wave (a) accelerogram and (b) pseudo velocity response spectrum

本報その2では、Fig. 1に示す Art Hachinohe200波を用いた。Art Hachinohe200は減衰定数 $\zeta=0.05$ に対して疑似速度応答スペクトルが200cm/sとなる告示波であり、位相特性は1968 八戸 EWとなる地震波である。本章では、本報その1で示した、等価線形モデルの妥当性の検証を行う。本報その2では、Fig.1に示した Art Hachinohe200波を対象として、オリジナルの非線形特性を有するモデル（以下、非線形モデル）の最大変位が0.01, 0.05, 0.07, 0.1, 0.13, 0.16, 0.2, 0.27, 0.3mになるようにフィードバック制御系のコントローラゲインを調節し、等価線形モデルと非線形モデルの比較を行った。

Fig. 2中において、赤Xは非線形モデルと等価線形モデルの応答の最大応答の比率を示し、 x は非線形モデルの変位を示し、 \hat{x} は等価線形モデルの変位を示す。また、 W_v 、 W_d 、 W_u はそれぞれ、構造減衰、履歴ダンパー、アクティブ制御入力による吸収エネルギーを、 E は地震入力エネルギーを示し、以下の式により与えられる。

$$W_v = \int_0^{t_f} [c\dot{x}(t)]\dot{x}(t) dt \quad (1a)$$

$$W_d = \int_0^{t_f} F_d(t)\dot{x}(t) dt \quad (1b)$$

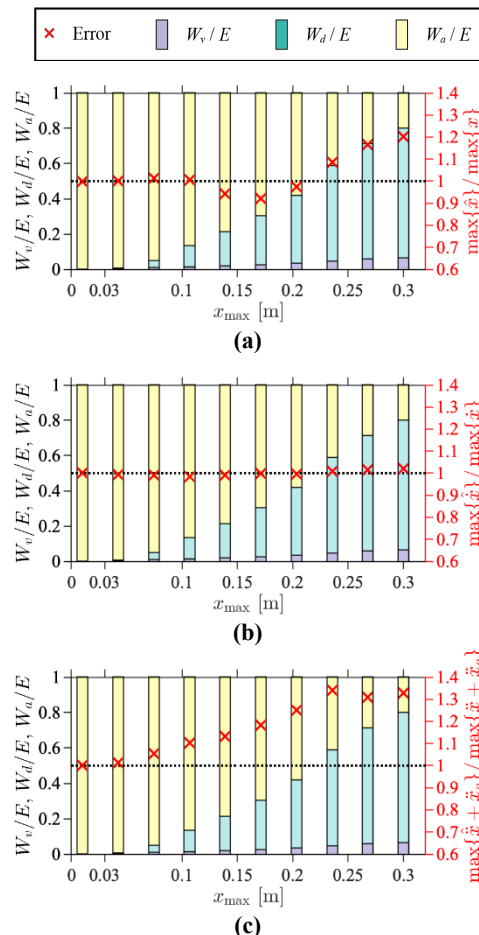


Fig. 2. Comparison of equivalent model and nonlinear model (with active control) for maximum values of (a) displacement and (b) velocity

$$W_a = \int_0^{t_f} u(t)\dot{x}(t) dt \quad (1b)$$

$$E = \int_0^{t_f} m\ddot{x}_g(t)\dot{x}(t) dt \quad (1d)$$

Fig. 2において左側縦軸は地震入力と、構造減衰、ダンパー、アクティブ制御入力に吸収したエネルギーの比率を示し、右側縦軸は、非線形モデルと線形モデルの最大値の誤差（非線形モデルの応答最大値に対する、線形モデルの最大応答値）を示す。Fig. 2より、等価線形化モデルを用いることにより、非線形系の最大応答値を凡そ評価できていることが示された。また最大応答変位を小さくするようなコントローラゲインを設計することで、制御入力による吸収エネルギー量が支配的となり、0.01 m変位になるように設計したケースでは、地震入力エネルギーの殆どを制御入力により吸収していること

が分かる。一方で、最大応答変位を比較的大きい値まで許容できる場合は、履歴ダンパーによる吸収エネルギーが支配的になることがわかった。

3. 応答スペクトルを用いたアクティブ制御系の設計手法

本章では、建築物の構造設計で一般的に用いられている応答スペクトルを、非線形特性を有するアクティブ免震モデルの設計手法へと拡張を行う。制御無しの場合のモデルの諸元を以下に示す。
固有周期：3 s，減衰比：0.20 ($m = 1 \text{ kg}$, $k = 4.39 \text{ N/m}$, $c = 0.84 \text{ Ns/m}$)，ダンパー降伏時のせん断力係数：0.03。

Fig. 4 に、Art Hachinohe200 の変位応答スペクトルおよび加速度応答スペクトルの関係図を示す。本報では最大変位を 40 cm 以下になるように、最大加速度が 200 cm/s^2 をクライテリアとし、応答波がこれらの値未満になるように制御系の設計を行う。Fig. 4 より、これらのクライテリアを満たすには、等価減衰定数を 0.50、等価固有周期を 4 s 程度に設定することで、目標クライテリアを満たす系が設計されることが分かる。

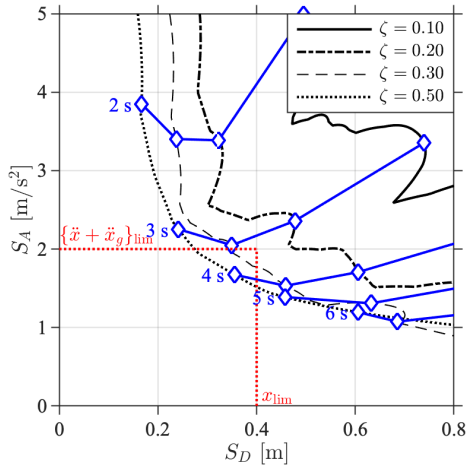


Fig. 4 Displace response spectrum vs. acceleration response spectrum

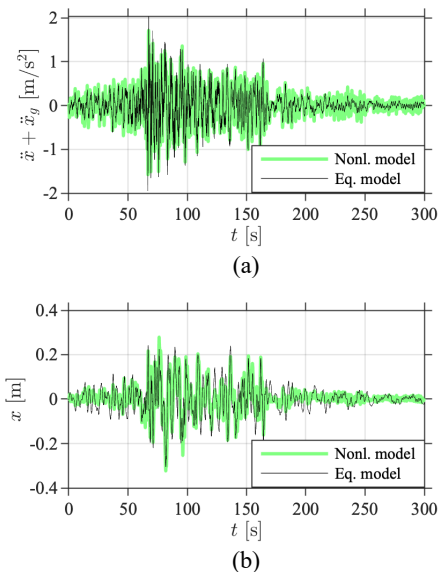


Fig. 5 Comparison of Nonl. model and eq. linear model for time history of (a) abs. acceleration and (b) displacement

本論文では、等価減衰定数が 0.50、固有周期が 4s となるように、LQR の重みを調節してチューニングを行い、等価線形モデルと非線形モデルでの応答比較を行った。

Table 1. Comparison of Nonlinear model and equivalent model for maximum response

	Linear. Model (1)	Nonlinear. model (2)	(1)/(2).
Max. of disp [m].	0.456	0.458	99.6%
Max. of acc. [m]	1.17	1.53	76.5%

その結果を Fig. 5 に示し、それぞれのモデルの最大応答値を Table.1 に示した。その結果、変位および加速度の目標クライテリアが満たされるような制御系の設計ができることが確認された。また、等価線形化モデルと非線形モデルでの、誤差(非線形モデルの応答値に対する線形モデルの応答値)は、変位では 99%両者の値は一致し、最大加速度でも、両者の値は約 77%一致したことから、等価線形化モデルにより、非線形モデルの最大値をおおよそ評価できている他、所望する特性を有するアクティブ免震の設計が可能であることが示された。

4. まとめ

本報では、その 1 で示された等価線形モデルの妥当性の検証を行った。さらに、等価線形化モデルを応答スペクトルへと適用することで、非線形特性をもつアクティブ免震の設計手法の提案を行った。その結果、以下が明らかとなった。

- 等価線形化モデルを用いることにより、非線形特性を有するアクティブ免震の応答の凡その評価が可能になる。
- 最大応答変位が小さくなるような設計を行う場合は、アクティブ制御入力による吸収エネルギー量が支配的になるが、最大応答変位を大きい値に許容できる場合は、履歴ダンパーの吸収エネルギーが支配的となる。
- さらに、等価線形化モデルの等価固有周期および等価減衰定数を応答スペクトルへと用いることにより、所望の特性を持つアクティブ制御系の設計が可能になる。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 (課題番号 201923456) の助成を受けたものであり、一部は JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (JPMJOP1723) によるものである。

参考文献

- 1) 日本免震構造協会：免震建築物計画推移棟数、<http://www.jssi.or.jp/menshin/doc/ms_ss_data.pdf>、2016
- 2) 背戸一登、構造物の振動制御、コロナ社、2006
- 3) Kou Miyamoto, Jinhua She, Daiki Sato, and Nobuaki Yasuo, Automatic determination of LQR weighting matrices for active structural control, Engineering Structures, Vol. 174, pp. 308-321, 2018.
- 4) Daiki Sato, Yinli Chen, Kou Miyamoto, and Jinhua She, A spectrum for estimating the maximum control force for passive-base-isolated buildings with LQR control, Engineering Structures, Vol. 199, 2019.

*1 日本学術振興会特別研究員 DC1
*2 東京工業大学 建築学系 博士課程 修士 (工学)
*3 東京工業大学 未来産業技術研究所 博士 (工学)
*4 清水建設 技術研究所 博士 (工学)
*5 東京工科大学 工学部機械工学科 博士 (工学)

*1 JSPS Research Fellows DC1
*2 Tokyo Institute of Tech. Dept. of Arch. & Bldg. Eng. M.S. Eng.
*3 Tokyo Institute of Tech. FIRST Dr. Eng.
*4 Shimizu Corporation. Institute of Tech. Dr. Eng.
*5 Tokyo University of Technology. Dept. of Mech. Eng. Dr. Eng.