

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   |
| Title(English)    | Equivalent linear model of active structural control system with hysteretic damper |
| 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 / Citation     | 日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 357-360   |
| Citation(English) | , , , pp. 357-360  |
| 発行日 / Pub. date   | 2021, 3  |

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

構造—振動

正会員 ○ 陳 引力<sup>\*1,2</sup>

正会員 佐藤大樹<sup>\*3</sup>

〃 宮本 皓<sup>\*4</sup>

〃 余 錦華<sup>\*5</sup>

アクティブ制御 免震構造 非線形

履歴型ダンパー 等価線形モデル

1. はじめに

兵庫県南部地震の後から、建築物が崩壊することを防ぐのみならず、建築物の損傷をできるだけ少なくすることを目的として、免震構造を採用する建築物の件数が急激に増えている<sup>1)</sup>。現在では多くの建築物が免震構造を採用しており、近年では、超高層建築物への適用も視野にいれ、アクティブ制御を併用した免震建築物により、更なる制御性能を引き出す研究も報告されている<sup>2)~4)</sup>。

従来では、アクティブ制御系は一般的に試行錯誤的に設計されている。免震とアクティブ制御の併用を考慮すると、設計パラメーターが増加し、制御系の設計が大変複雑になる。この問題を解決するために、筆者らは免震とアクティブ制御との併用を考慮した制御系の簡易設計方法を提案した<sup>5)~7)</sup>。これらの方法では、時刻歴応答解析と試行錯誤を行わずに、設計クリアエリアを満たす制御系を簡易的に設計することができる。実際の免震建築物では、免震層の変位応答を抑えるために、非線形特性を有する鋼材履歴型ダンパーを設置することが多い。しかし、筆者らが提案した方法は線形モデルのみに対応することにより、適用が限定されている。一方で、制振設計の場合は、非線形履歴ダンパーを等価な線形ダンパーを置き換え、非線形モデルの等価線形モデルを構築することができる<sup>8)</sup>。この等価線形化の手法をアクティブ制御に拡張することで、筆者らが提案した制御系の設計手法を非線形モデルに拡張できることが期待できる。

本研究は免震とアクティブ制御との併用を考慮した非線形制御系の簡易設計方法の提案を最終目的とする。本報は先行研究として、非線形免震層とアクティブ制御を併用したモデルの等価線形方法を提案する。数値例で、提案された方法の妥当性について確認する。

2. 建築物モデルと入力地震波の概要

本研究では Fig. 1 で示される 1 自由度アクティブ非線形モデル（非線形ダンパーを有する制御系）を用いる。モデルのパラメーターを Table 1 に示す。

ここで、アクティブ制御を有する系（以下、アクティブモデル）の運動方程式を次式に示す。

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) + F_d(t) = -m\ddot{x}_g(t) - u(t) \quad (1)$$

ここに、 $x$  : 応答変位、 $m$  : 質量、 $k$  : 剛性、 $c$  : 減衰係数、 $F_d$  : ダンパーの復元力、 $\ddot{x}_g$  : 地動加速度、 $u$  : 制御力である。

本研究は履歴型ダンパーを用い、その復元力の特徴を Fig. 2 に示す。履歴ダンパーの剛性  $k_d$  は次式で定義される。

$$k_d = \frac{F_{dy}}{x_{dy}} \quad (2)$$

ここで、 $F_{dy}$  はダンパーの降伏力であり、 $x_{dy}$  は降伏変位である。ダンパーの降伏力は

$$F_{dy} = \alpha_{dy}mg \quad (3)$$

で与えられる。ここに、 $g$  は重力加速度であり、 $\alpha_{dy}$  はダンパー降伏時のせん断力係数である。Table 2 に履歴型ダンパーのパラメーターを示す。

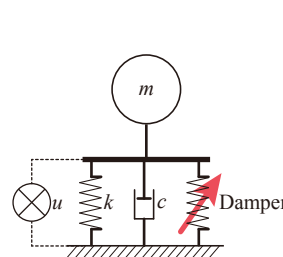


Fig. 1 Active model

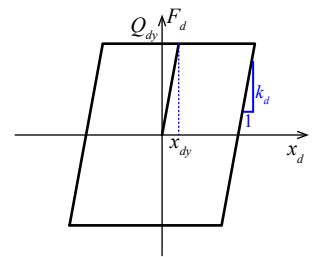


Fig. 2 Restoring force of hysteretic damper

Table 1 Parameters of active nonlinear model

| Mass [kg] | Stiffness [N/m]    | Damping coefficient [Ns/m] |
|-----------|--------------------|----------------------------|
| 1.0 kg    | 39.48 ( $T = 1$ s) | 0.63                       |
|           | 9.87 ( $T = 2$ s)  | 0.31                       |
|           | 4.39 ( $T = 3$ s)  | 0.21                       |
|           | 2.47 ( $T = 4$ s)  | 0.16                       |
|           | 1.58 ( $T = 5$ s)  | 0.13                       |
|           | 1.10 ( $T = 6$ s)  | 0.10                       |

(damping ratio: 0.05)

Table 2 Parameters of active nonlinear model

| Parameter                     | Symbol        | Value |
|-------------------------------|---------------|-------|
| Shear-force coefficient ratio | $\alpha_{dy}$ | 0.02  |
| Stiffness [N/m]               | $k_d$         | 6.53  |
| Yield displacement [cm]       | $x_{dy}$      | 3     |
| Yield force [N]               | $F_{dy}$      | 0.20  |

### 3. 制御系の構築

アクティブモデルの運動方程式(式(1))を状態空間に変換すると

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) - B_d F_d(t) + B_g \ddot{x}_g(t) - B_u u(t) \quad (4)$$

になる。ここに、 $Z$ : 状態ベクトル、 $A$ : システムマトリックス、 $B_d$ : ダンパー入力ゲイン、 $B_u$ : 制御入力ゲイン、 $B_g$ : 地震入力ゲインである。 $Z$ ,  $A$ ,  $B_u$ ,  $B_d$ は式(5)による。

$$Z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k/m & -c/m \end{bmatrix} \quad (5a, b)$$

$$B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m \end{bmatrix}, \quad B_g = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m \end{bmatrix} \quad (5c, d, e)$$

本報では、フィードバック制御を行い、以下の制御則を持つ。

$$u(t) = K_P Z(t) = [K_{PD} \quad K_{PV}] \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} = K_{PD} x(t) + K_{PV} \dot{x}(t) \quad (6)$$

ここに、 $K_P$ : フィードバックゲインであり、 $K_{PD}$ と $K_{PV}$ はそれぞれ変位および速度応答に対するフィードバックゲインである。Fig.3に制御系のブロック線図を示す。

本報ではLQR方法を用いて、コントローラゲインを設計し、次式の評価関数 $J$ を最小にするように決定される。

$$J = \int_0^{\infty} [Z^T(t)QZ(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (7)$$

ここで、 $Q$ と $R$ はそれぞれ状態と制御力に対する重みである。本報では $Q$ と $R$ を次式のように設定する。

$$Q = q \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = 1 \quad (8a, b)$$

ここに、 $q$ は重み指数である。式(7)より、フィードバックゲイン $K_P$ は

$$K_P = -B_u^T P \quad (9)$$

で計算され、ここで、 $P$ は次式表されるリカッチ代数方程式の解である<sup>9)</sup>。

$$A^T P + PA - PB_u R B_u^T P + Q = 0 \quad (10)$$

### 4. 非線形アクティブモデルの等価線形モデル

本論文では等価線形モデルを線形の本ネとダッシュポットで構成されたパッシブ制御と同じ機構をもつモデルと定義し、ある入力に対する応答が等しくなるような線形本ネおよびダッシュポットを決定する。

#### 4.1 等価線形モデルの構築

非線形履歴ダンパーの復元力を等価線形の本ネとダッシュポットで置き換えることにより、

$$F_{d,eq}(t) = k_{d,eq} x(t) + c_{d,eq} \dot{x}(t) \quad (11)$$

が得られる。ここに、 $F_{d,eq}$ : 非線形履歴ダンパーの等価線形復元力、 $k_{d,eq}$ : 履歴ダンパーの等価剛性、 $c_{d,eq}$ : 履歴ダンパーの等価粘性係数である。

式(6)と式(11)を式(1)に代入すると、等価モデルの運動方程式になる。

$$m\ddot{x}(t) + c_{eq}\dot{x}(t) + k_{eq}x(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (12)$$

ここで、 $k_{eq}$ と $c_{eq}$ はそれぞれ等価モデルの剛性と粘性係数であり、 $k_{eq}$ と $c_{eq}$ は次式で定義される。

$$k_{eq} = k + K_{PD} + k_{d,eq} \quad (13a)$$

$$c_{eq} = c + K_{PV} + c_{d,eq} \quad (13b)$$

#### 4.2 履歴ダンパーの等価剛性と等価粘性係数の算出

履歴ダンパーの等価剛性は最大点剛性により算出する[Fig. 5(a)]。

$$k_{d,eq} = \frac{F_{d,max}}{x_{max}} \quad (14)$$

ここに、 $F_{d,max}$ はダンパーの最大復元力であり、 $x_{max}$ は最大応答変位である。

履歴ダンパーの1サイクル間で吸収するエネルギー $\Delta W$ は

$$\Delta W = 4F_{dy}(x_{max} - x_{dy}) \quad (15)$$

で計算され、剛性 $k_{eq}$ を持つ粘性ダンパーの1サイクルで吸収するエネルギー $\Delta D$ は

$$\Delta D = \pi c_{d,eq} \omega_{eq} x_{max}^2 \quad (16)$$

である[Fig. 5(b)]。ここに、 $\omega_{eq}$ は等価モデルの固有円振動数である。

$\Delta W = \Delta D$ と仮定することにより、等価モデルの粘性係数 $c_{d,eq}$ が得られる。

$$c_{d,eq} = \frac{4F_{dy}(x_{max} - x_{dy})}{\pi \omega_{eq} x_{max}^2} \quad (17)$$

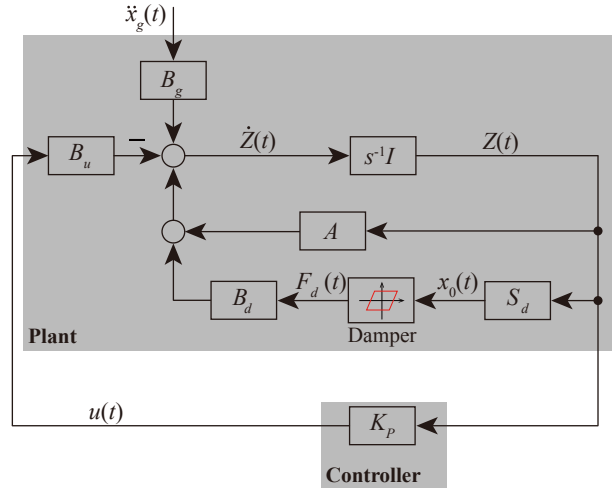


Fig. 3 Block diagram of control system

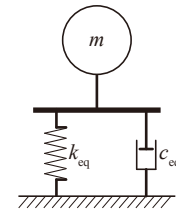
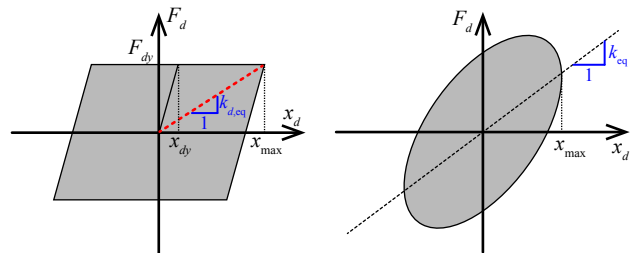


Fig. 4 Equivalent linear model



(a) Equivalent stiffness (b) Equivalent damping coefficient

Fig. 5 Equivalent stiffness and equivalent damping coefficient

## 5. 数値例

本章では、数値解析を用いて、非線形アクティブモデルの精度検証を行う。

### 5.1 入力地震波

検討用地震動は、コーナー周期 0.64 s 以降の領域で、擬似速度応答スペクトル  $pS_V = 100$  cm/s (減衰 5%) となる模擬地震動波形 Art Kobe (位相特性: JMA Kobe NS) を用いる。Fig. 6 に Art Kobe の時刻歴波形および擬似速度応答スペクトルを示す。

### 5.2 制御系の設計と等価モデルの構築

本論文では LQR 方法を用いて、制御系を設計する。式 (8) で示されたように、重み行列に重み係数  $q$  のみを設置する。本章では、制御系の最大応答変位をそれぞれ 5 cm, 10 cm, 15 cm を抑えるために、重み係数  $q$  を試行錯誤的に決める。Table 3 に各ケースにおいて重み係数  $q$  算出した値を示す。また、Tables 4 and 5 に式(14)と式(17)で算出した非線形履歴ダンパーの等価剛性  $k_{d,eq}$  と等価粘性係数  $c_{d,eq}$  を示す。なお、等価剛性  $k_{d,eq}$  と等価粘性係数  $c_{d,eq}$  の算出は最大変位  $x_{max}$  は既知の値 (5 cm, 10 cm, 15 cm) とする。

### 5.3 数値解析結果

Fig. 7 に各ケースにおいて等価モデルの誤差(error), ダンパーの吸収エネルギー ( $W_d$ ) と地震入力エネルギー ( $E$ ) の割合を示す。なお, error,  $W_d$  と  $E$  は次式で定義される。

$$\text{error} = \frac{|\text{res}_{eq} - \text{res}_{\text{nonlinear}}|}{\text{res}_{\text{nonlinear}}} \quad (18a)$$

$$W_d = \int_0^{t_f} \dot{x}(t) F_d(t) dt \quad (18b)$$

$$E = \int_0^{t_f} \dot{x}(t) m \ddot{x}_g(t) dt \quad (18c)$$

ここに,  $\text{res}_{eq}$ : 解析等価モデルの解析結果で,  $\text{res}_{\text{nonlinear}}$ : 非線形アクティブモデルの解析結果,  $t_f$ : 地震終了時間である。

Fig. 7 より, 以下の結果が得られる。

モデルの最大応答変位を大きくすると,  $W_d/E$  の値が大きくなる。

- 本論文で道いられた全てのケースにおいて, 等価線形モデルで推定された最大応答と最大制御力の誤差は 15% より小さい。
- 等価モデルの推定誤差とダンパーの吸収するエネルギー  $W_d$  の割合に明らかな関係が確認できない。

## 6. まとめ

本報では、非線形な鋼材履歴ダンパーが設置された免震層とアクティブ制御系を併用した非線形モデルの等価線形方法を提案した。また、数値例を用いて、構築された等価線形モデルの最大応答を非線形アクティブモデルと比較した。本論文で用いられたケースにおいて、投下線形モデルで推定された最大応答と最大制御力の誤差は 15% 以内になったことが数値例からわかった。そのため、提案された等価線形方法の妥当性を確認した。

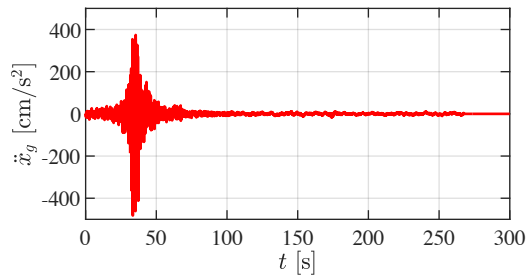
今後の課題は等価線形モデルに誤差の生じる原因の解析と非線形アクティブモデルの簡易設計方法の提案を目的とする。

## 謝辞

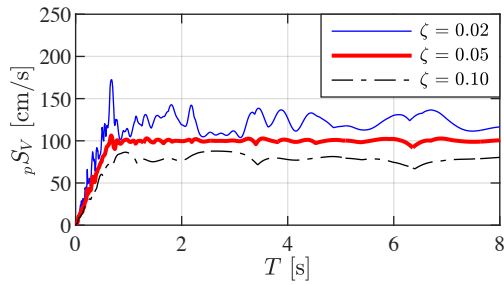
本研究の一部は JSPS 科研費 (課題番号 201923456) の助成を受けたものであり, 一部は JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (JPMJOP1723) によるものである。

## 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](http://www.jssi.or.jp/menshin/doc/ms_ss_data.pdf)>, 2016
- 2) 吉岡宏和, スペンサー Jr., B.F.: MR ダンパーを用いたスマート免震構造の振動台実験, 理論応用力学講演会公演論文集, pp. 65-66, 2002. 5
- 3) Kim Hyun-Su, Roschke N. Paul: GA-fuzzy control of smart base isolated benchmark building using supervisory control technique. Advance in Engineering Software, Vol.38, pp. 453-465, 2007. 7
- 4) S. Korkmaz, A review of active structural control: challenges for engineering informatics, Computers & Structures, Vol. 89, 2011.7
- 5) Yinli Chen, Daiki Sato, Kou Miyamoto, Jinhua She: Estimating the maximum response and maximum control force for high-rise base-isolated buildings with active structural control in along-wind direction, Engineering Structures, Vol. 216, pp. 110712
- 6) Daiki Sato, Yinli Chen, Kou Miyamoto, Jinhua She: A spectrum for estimating the maximum control force for passive-base-isolated buildings with LQR control, Engineering Structures, Vol. 199, 2019.9.
- 7) 陳引力, 佐藤大樹, 余錦華, 宮本皓: 風方向風力を受けるアクティブ制御とパッシブ免震を併用した超高層建物に対する制御系の設計方法, 風工学研究論文集, No. 26, 2020.
- 8) Architectural Institute of Japan, Design Recommendations for Seismically Isolated Buildings, Architectural Institute of Japan, 2016.
- 9) 森泰親: わかりやすい現代制御理論, 2016. 2



(a) Accelerogram



(b) Pseudo-velocity response spectrum

Fig. 6 Art Kobe wave

Table 3 Values of  $q$  for all cases

| $x_{\max}$ | $T$   |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            | 1 s   | 2 s   | 3 s   | 4 s   | 5 s   | 6 s   |
| 5 cm       | 59.38 | 75.00 | 75.00 | 73.44 | 71.88 | 71.88 |
| 10 cm      | 5.86  | 9.38  | 8.79  | 8.20  | 8.40  | 8.20  |
| 15 cm      | 0.02  | 3.03  | 3.61  | 2.78  | 2.73  | 2.73  |

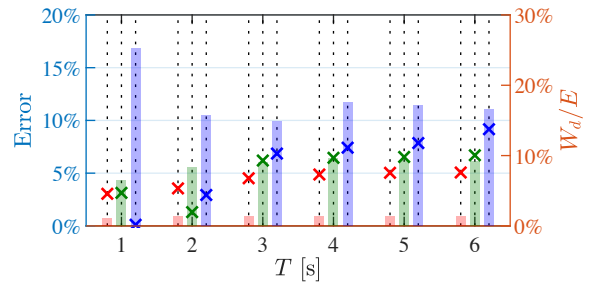
Table 4 Values of  $k_{d,eq}$  for all cases (unit: N/m)

| $x_{\max}$ | $T$  |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|
|            | 1 s  | 2 s  | 3 s  | 4 s  | 5 s  | 6 s  |
| 5 cm       | 3.92 | 3.91 | 3.91 | 3.91 | 3.91 | 3.91 |
| 10 cm      | 1.95 | 1.96 | 1.96 | 1.96 | 1.96 | 1.96 |
| 15 cm      | 1.31 | 1.30 | 1.30 | 1.30 | 1.30 | 1.30 |

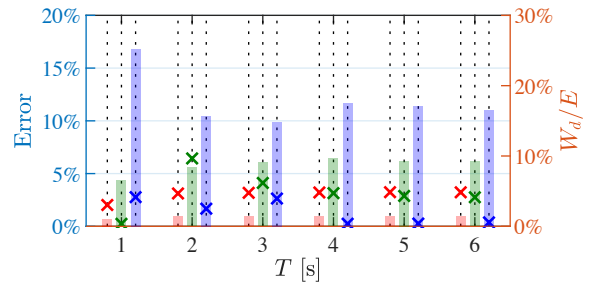
Table 5 Values of  $c_{d,eq}$  for all cases (unit: Ns/m)

| $x_{\max}$ | $T$  |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|
|            | 1 s  | 2 s  | 3 s  | 4 s  | 5 s  | 6 s  |
| 5 cm       | 0.30 | 0.48 | 0.54 | 0.55 | 0.56 | 0.57 |
| 10 cm      | 0.27 | 0.49 | 0.64 | 0.72 | 0.76 | 0.78 |
| 15 cm      | 0.20 | 0.39 | 0.54 | 0.64 | 0.70 | 0.73 |

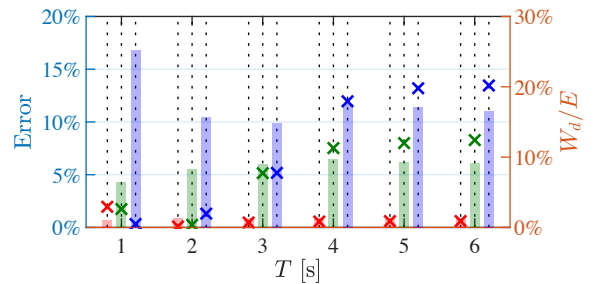
| $x_{\max}$ | 0.05 | 0.10 | 0.15 |
|------------|------|------|------|
| Error      | ×    | ×    | ×    |
| $W_d/E$    | ■    | ■    | ■    |



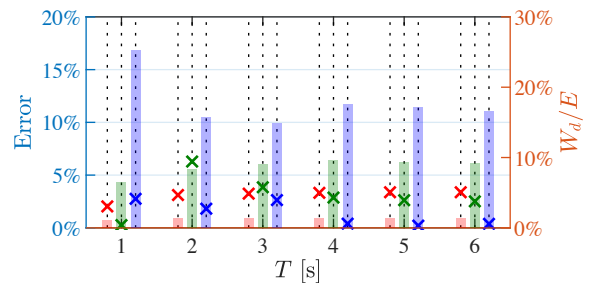
(a) Displacement response



(b) Velocity response



(c) Absolute acceleration response



(d) Control force

Fig. 7 Error of maximum responses of equivalent model

\*1 東京工業大学環境・社会理工学院

\*2 日本学術振興会特別研究員 DC1

\*3 東京工業大学未来産業技術研究所 准教授・博士 (工学)

\*4 清水建設技術研究所 研究員・博士 (工学)

\*5 東京工科大学工学部 教授・博士 (工学)

Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology

JSPS research fellows DC1

Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Researcher, Institute of technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

Prof., School of Engineering, Tokyo University of Technology, Dr. Eng.