T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

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, 佘錦華				
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)	, , рр. 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

アクティブ制御	免震構造	非線形
履歴型ダンパー	等価線形刊	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¹⁾。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²⁾⁻⁴⁾。

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 5~7)。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、設計クリアテ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 ⁸⁾。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。

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

Equivalent linear model of active structural control system with hysteretic damper

正会員() 陳 引力 ^{*1,2}	正会員	佐藤大樹*3	
]]	宮本 皓*4]]	佘 錦華*5	

本研究は履歴型ダンパーを用い,その復元力の特性を 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。

$$k_d = \frac{F_{dy}}{x_{dy}} \tag{2}$$

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

 $F_{dy} = \alpha_{dy}mg$ (3) で与えられる。ここに、g は重力加速度であり、 α_{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	α_{dy}	0.02
Stiffness [N/m]	k_d	6.53
Yield displacement [cm]	x_{dy}	3
Yield force [N]	F_{dy}	0.20

Yinli CHEN, Daiki SATO, Kou MIYAMOTO and Jinhua SHE

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

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

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

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

ここに, K_P : フィードバックゲインであり, $K_{PD} \ge K_{PV}$ 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。

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

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

 $Q = q \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \qquad R = 1$ (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

$$K_P = -B_u^T P \tag{9}$$

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⁹。

$$A^T P + PA - PB_u RB_u^T P + Q = 0 \tag{10}$$

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バネとダッシュポ 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 形バ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バネとダッ シュポットで置き換えることより,

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

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

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

$$k_{\rm eq} = k + K_{PD} + k_{d,\rm eq} \tag{13a}$$

$$c_{\rm eq} = c + K_{PV} + c_{d,\rm eq} \tag{13b}$$

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)]。

$$k_{d,\text{eq}} = \frac{F_{d,\max}}{x_{\max}} \tag{14}$$

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 ΔWは

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

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 ΔD は

$$D = \pi c_{d,eq} \omega_{eq} x_{max}^2 \tag{16}$$

である[Fig. 5(b)]。ここに、 ω_{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。

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

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 $_pS_V = 100 \text{ cm/s}$ (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 出は最大変位 x_{max} は既知の値(5 cm, 10 cm, 15 cm)とする。

5.3 数值解析結果

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。

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

$$W_d = \int_0^{t_f} \dot{x}(t) F_d(t) \,\mathrm{d}t \tag{18b}$$

$$E = \int_0^{t_f} \dot{x}(t) m \ddot{x}_g(t) \,\mathrm{d}t \tag{18c}$$

ここに、 res_{eq} :解析等価モデルの解析結果で、 $res_{nonlinear}$: 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₩a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

- 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
- 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
- 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
- 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 baseisolated buildings with active structural control in along-wind direction, Engineering Structures, Vol. 216, pp. 110712
- 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,佘錦華,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.

 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



Fig. 6 Art Kobe wave

Table 3	Values	of a fo	or all	cases
Tuble 5	vulue5	01 9 10	n un	cuses

				Г		
$\chi_{\rm max}$	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

Та	ble 4	Values of $k_{d,eq}$ for all cases (unit: N/m)					
		Т					
X _{max} "	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 Cdar	for all	cases ((unit: Ns/m))
Table 5	varues	or called	101 all	Cusco ((umr. 133/m)	,

			í	Г		
Xmax	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



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.