

能動制御方式同調粘性マスダンパーを有する制振システムのアクティブ・パッシブ切換制御手法に関する研究

栗田研究室

4108620 関根 拓磨

1.はじめに

同調粘性マスダンパーは建物とそれに付加した振動系の同調によって応答を低減させる制振装置の一種である。齊藤ら^{1),2)}によって建物に適切に同調させる設計法が提案されているが、装置粘性体の非線形力学特性により入力外乱の強さによって制振効果が不安定となる問題が生じるため、実適用に当たっては対策を別途講じる必要があると考えられる。そこで、本研究では、入力外乱によらず安定して制振効果が得られる制振システムの構築を目的として、同調粘性マスダンパーにモーターを付加して制御を行う制振装置を新たに考え、この制振装置の設計における一つの考え方を提示する。また、制振装置の能動的な制御に当たっては電源供給等の問題から制御・非制御の切換を行う必要があるが、この切換の手法を論じた研究は未だ少ない。よって、制御(アクティブ)・非制御(パッシブ)の切換という設計上の課題を取り上げ、解決のための手法の提案とその有効性の確認を目的として検討を行う。

2.対象とする制振装置の機構とモデル化

2.1 モーターを付加した増幅機構付き減衰装置

本研究では、図1に示すようなボールねじとボールナットからなる増幅機構付き減衰装置にモーターを接続した制振装置を検討の対象とする。増幅機構付き減衰装置とは、制振装置両端に生じる軸方向運動を付加質量の回転運動に変換することで実質量の千倍以上もの慣性力を得ることのできる制振装置である。また、生じた運動エネルギーを筒内に充填された粘性体によって消散することでエネルギー吸収を行う。本研究で新たに付加したモーター部分は、外部から電圧を加えないとき、発電機として機能し誘導起電力によって制振装置両端の速度差に比例する減衰力を生じる(図2(a)パッシブ)。さらに、モーター端子間に外部から電圧を加えると、電圧に比例する制御力が制振装置両端に加わる(図2(b)アクティブ)。

装置減衰力 Q_d は装置粘性体の非線形減衰力と誘導起電力によって生じる減衰力の和とし、制振装置両端の速度差 \dot{x}_d を用いて式(1)のように表わされる。また、能動制御力 f_c はモーター端子間の電圧 E_c を用いて式(2)のように表わされる。

$$Q_d = c_\kappa \cdot \text{sgn}(\dot{x}_d) \cdot |\dot{x}_d|^\kappa + c_c \cdot \dot{x}_d \dots (1), \quad f_c = K_c \cdot E_c \dots (2)$$

(c_κ : 非線形減衰係数(粘性体) c_c : 線形減衰係数(誘導起電力により生じる)^{※)}
 κ : 粘性体の非線形性を表す定数 K_c : モーターの特性により定まる定数^{※)})

※1 モーターの内部抵抗, トルク定数, 誘導起電力定数等により定まる

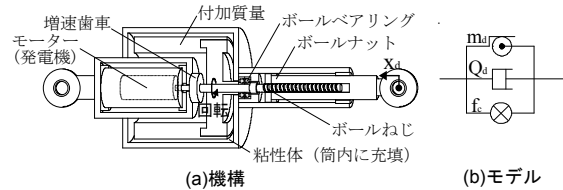


図1 モーターを付加した増幅機構付き減衰装置

(m_d : 回転慣性質量 f_c : 能動制御力
 Q_d : 装置減衰力(粘性体+発電機) x_d : 装置変形(装置両端の軸方向変位)

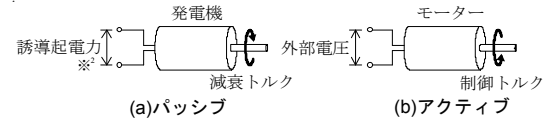


図2 パッシブ時とアクティブ時の動作原理

※2 アクティブ(モーター)では逆起電力として働く

2.2 能動制御方式同調粘性マスダンパー

能動制御方式同調粘性マスダンパーとは、前節で示した制振装置の設置に伴う支持部材剛性、及び装置の減衰係数を定点理論に基づく最適設計法¹⁾により定め、パッシブ状態で建物の振動周期に同調させるよう設計したものと定義する。その際、粘性体の非線形性を考慮し、平均エネルギー吸収量に基づく置換法²⁾(式(3))によって非線形減衰係数を定める。

$$c^* = \frac{3}{\kappa + 5} \cdot \frac{b^{\kappa}}{(\omega^{\kappa} x^{\kappa})_{\max}} \cdot (1 - \mu) \cdot c_{opt}^{\kappa} \dots (3)$$

(ω_k : 共振時固有円振動数 $x_{d,max}$: 最大装置変形 c_{opt} : 線形最適減衰係数)
 $\beta_k = \frac{2^{2+\kappa} \Gamma(1 + \kappa/2)}{\pi \Gamma(2 + \kappa)}$ $\Gamma(\cdot)$: ガンマ関数 η : 誘導起電力によるエネルギー吸収量の割合)

また、検討に際して能動制御方式同調粘性マスダンパーを有する1層構造物を図3のようにモデル化した。

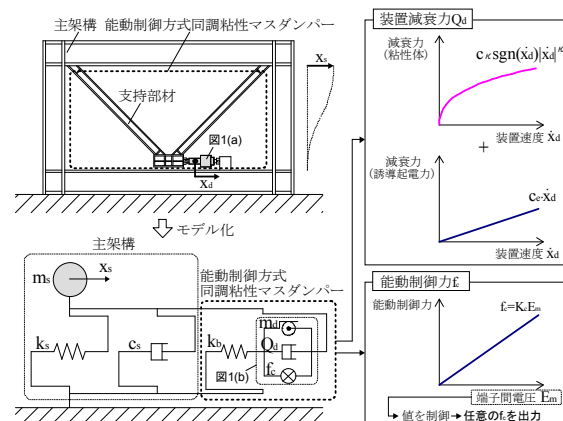


図3 能動制御方式同調粘性マスダンパーのモデル化

(m_s : 主架構質量 c_s : 主架構減衰係数 k_s : 主架構剛性)
 k_d : 支持部材剛性 x_s : 主架構変形)

3. 能動制御方式同調粘性マスダンパーを有する制振システムのアクティブ・パッシブ切換制御手法

3.1 制振システムの概要

提案する制振システムの概要を以下に示す(図4)。

(1)大地震時は電源供給等の問題から制御を行わずパッシブダンパーとして機能させる。

- ①大地震(本検討では $C_0=1.0$ 相当の地震)に対して最適設計システムと等価になるように同調粘性マスダンパーのパラメータを定める。
- ②中小地震時は制振効果が低下する可能性がある。

(2) 中小地震を対象としてアクティブ制御を行う。

- ③制振効果の低下する可能性がある中小地震(本検討では $C_0=0.2\sim 0.5$ 相当の地震)を対象として能動制御を行い、制振効果を向上する。
- ④制御の切換面を設定し(本検討では $C_0=0.5$ 相当の地震)、アクティブ・パッシブの切換を行う。

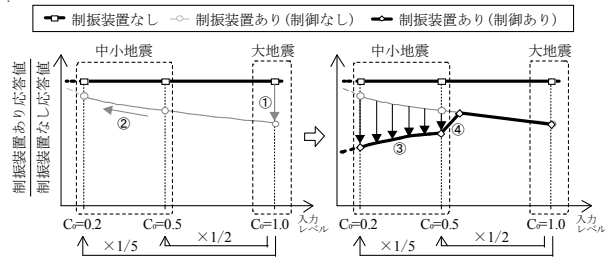


図4 制振システムの概要(上記①~④に対応)

3.2 アクティブ・パッシブ切換制御手法の定式化

本項では最適レギュレータに基づく可変ゲイン制御を応用したアクティブ・パッシブ切換制御手法の定式化を行う。最適レギュレータとは、制御力と応答の2次形式の和で表される評価関数を最小にする制御法であり、制御の目的が明確な方法である。また、可変ゲイン制御は、外乱に応じて時々刻々と制御ゲインを変化させる制御のことであり、不確定な入力外乱に対して制御ゲインの変化によって制御の効率化を図ることを目的としている(⇔定数ゲイン制御、図5)。特に長島ら³⁾の方法は、制御ゲインの急激な変化により生じる問題(制御の高速の切換、瞬間的に生じるパルス状の応答)を防ぐため、制御ゲインの切換を滑らかにする手法であり、上記制振システムにおけるアクティブ・パッシブの切換に対しても応用が可能であると考えられる。

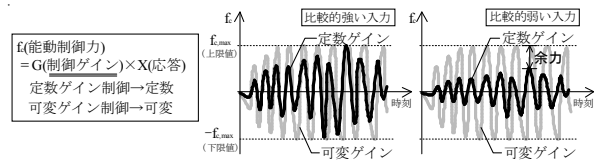


図5 定数ゲイン制御と可変ゲイン制御

(1)制御ゲイン行列の構成(図6)

①最適レギュレータにおける評価関数を式(4)、式(5)で与え、 α を適当な刻みで変化させて Riccati 方程式を解き、制御ゲインのサンプル値を求める。

②求めた制御ゲインのサンプル値から α について多項式近似を行い、制御ゲインを α の関数で表わす。

$$J = \int_0^{\infty} [X(t)^T \cdot [Q] \cdot X(t) + R(\alpha) \cdot f_c(t)^2] dt \dots (4), R(\alpha) = a \cdot e^{b\alpha} \dots (5)$$

$R(\alpha)$: 制御力に係る重み係数
 $[Q]$: 状態量に係る重み係数行列
 α : 制御ゲインの大きさを規定するパラメータ
 $f_c(t)$: 能動制御力
 $X(t)$: 状態量ベクトル
 a, b : R の条件により定まる定数

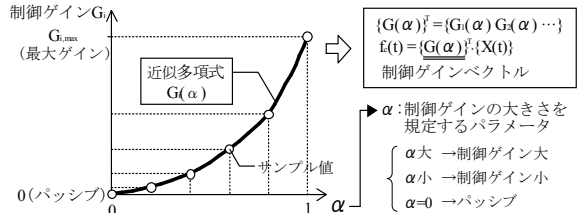


図6 制御ゲイン行列の構成

(2)制御ゲイン行列の更新アルゴリズム

α の値を更新すれば制御ゲインの値もそれに伴い更新される。以下に α の更新アルゴリズムの概要を示す。

①制御の効率化(長島らの方法、図7)

制御力がしきい値に対して小さいとき制御ゲインを大きく、大きいとき制御ゲインを小さく変化させることで制御力の上限値の範囲で効率化を図る(式(7))。

$$\alpha(t + \Delta t) = \alpha(t) + \Delta\alpha \cdot \left(1.0 - \frac{|f_c(t)|}{f_{c,aim}}\right) \dots (7)$$

(Δt : 制御時間間隔)
($\Delta\alpha$: α の変化率)

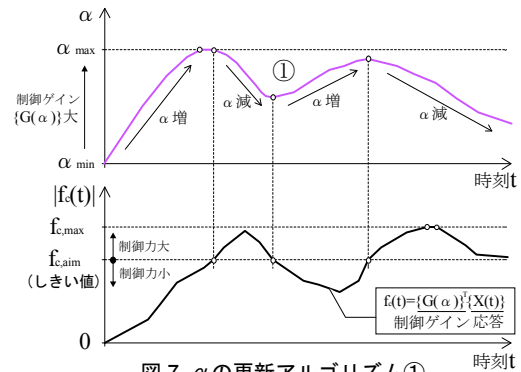


図7 α の更新アルゴリズム①

②アクティブ・パッシブの切換(本研究で追加、図8)

上記アルゴリズムに、観測値(<ex>地動入力加速度)がしきい値を超えた時刻から一定の時間 $T_{a \rightarrow p}$ をかけてアクティブ→パッシブの切換を滑らかにを行うアルゴリズムを追加する(式(8))。

$$\alpha(t + \Delta t) = (\alpha(t_0) - \alpha_{min}) \cdot \left(1 - \frac{t - t_0}{T_{a \rightarrow p}}\right) + \alpha_{min} \dots (8) \quad (0 \leq t - t_0 \leq T_{a \rightarrow p})$$

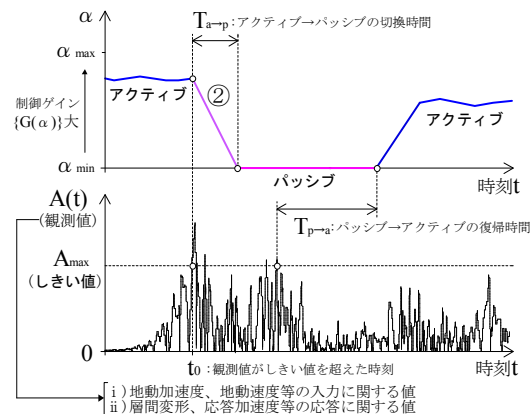


図8 α の更新アルゴリズム②

4. アクティブ・パッシブ切替制御手法の有効性の検討

4.1 検討方法

能動制御方式同調粘性マスダンパーを有する1質点系モデル(図3)に対して前章で述べた制御手法を適用し、地震応答解析によって地震入力レベルに応じた応答特性の変化を検討する。

4.2 解析パラメータ

解析に用いるパラメータを表1~表3に示す。

表1 建物

建物質量 m_s	100[ton]
固有周期 T_s	0.5[sec]
減衰定数 h_s	0.02
階高H	4500[mm]

表2 制振装置

質量比(m_d/m_s)	10[%] ※ ³
支持部材剛性 k_b	加速度最適設計法
非線形減衰係数 c_e	加速度最適設計法により 定めた最適値と等価に置換
装置減衰係数 c_d	
非線形性を表す定数 κ	0.35 ※ ^{4,5}
最大装置変形 x_d	7.76[cm] ※ ⁶

- ※³質量比(m_d/m_s)は回転慣性質量による増幅を考慮した値である
- ※⁴平均エネルギー吸収量に基づく置換法²⁾により大地震($C_0=1.0$ 相当)に対して最適設計システムとなるよう設計した
- ※⁵粘性体と誘導起電力のエネルギー吸収量の割合は地震時で、 $\eta=0.2$ (粘性体が8割、誘導起電力が2割)となるように定めた
- ※⁶置換に用いる最大変形値は用いる4地震波の平均値とした

表3 能動制御

状態量に係る重み係数行列[Q]	変位に係る係数を1.0としその他は0(変位制御)		
制御力に係る重み係数R	1.0-0.00001		
制御時間間隔 Δt	0.01[s]		
α	0-1.0		
α の変化率 $\Delta\alpha$	0.004 ※ ⁸		
最大制御力 $f_{c,max}$	2.5[tonf] ※ ⁷		
制御力のしきい値 $f_{c,lim}$	1.6[tonf] ※ ⁸		
地動入力加速度のしきい値	瞬間値	250[gal]	1秒平均値 ※ ⁹
地動入力速度のしきい値		25[kine]	12[kine/s]
アクティブ→パッシブの切替時間 $T_{a \rightarrow p}$	0.5[s]		
パッシブ→アクティブの復帰時間 $T_{p \rightarrow a}$	∞ ※ ¹⁰		

- ※⁷建物重量に対して2.5[%]と比較的小さい値を用いた
- ※⁸参考文献³⁾に示されている方法により定めた
- ※⁹入力の瞬間的な強さだけでなく、継続して強い入力を受けた場合を考慮して1秒間の平均値をしきい値として採用した
- ※¹⁰本検討ではパッシブからアクティブへの復帰は考えない

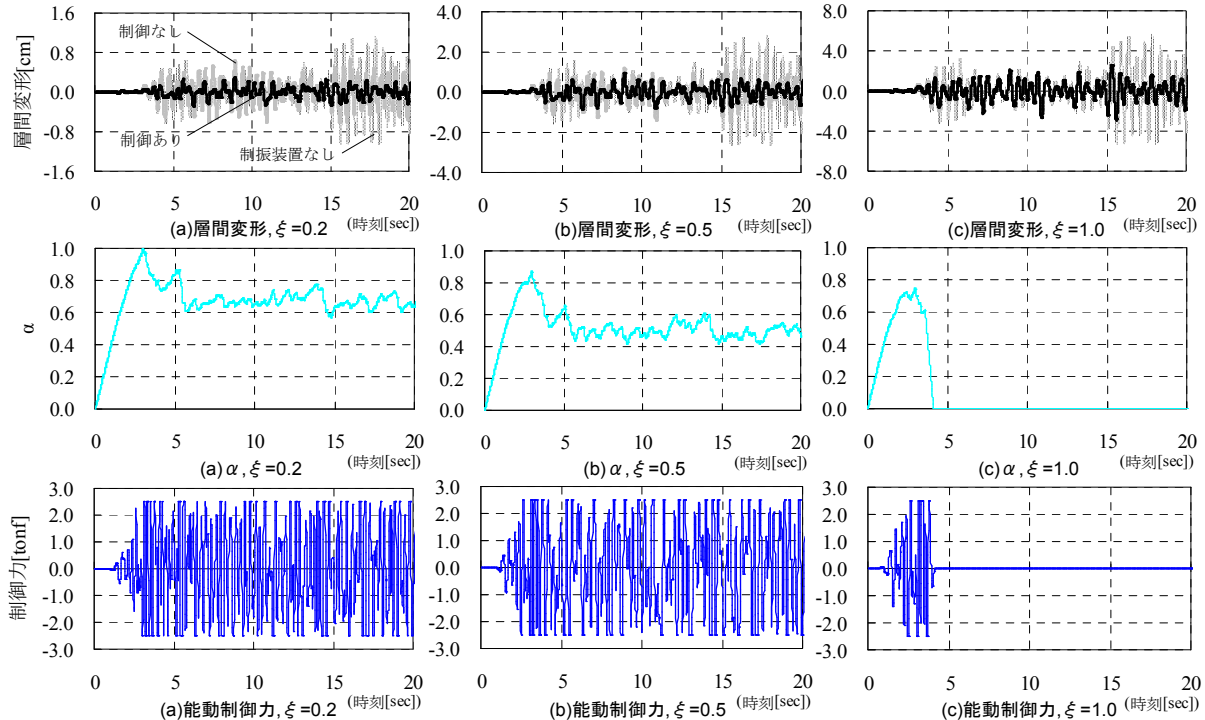


図9 時刻歴応答波形(BCJL2)

4.3 入力地震動と設計目標

本検討では、建設省(国土交通省)告示第1461号に規定されている「工学的基盤上の地震動」の加速度応答スペクトルを基準として、制振装置なしの応答加速度がそれぞれ等しくなるよう入力地震動の正規化を行い、これを $C_0=1.0$ 相当の地震動として扱う。また、正規化した地震動の最大加速度振幅 A_0 を基準とし、入力地震動の加速度振幅を $A_0 \times \xi$ とすることで入力地震動レベルを変化させる($\xi=0.2 \sim 1.0$, 0.1刻み)。検討に用いた各地震動について、正規化した最大加速度 A_0 を表4に、設計目標を表5に示す。

表4 入力地震動

地震波名	年	観測点	方向	A_0 [gal] ※ ¹¹
BCJL2		人工地震波		223 (0.63倍)
El-Centro	1940	El-Centro	NS	342 (1.00倍)
Taft	1952	Taft	EW	484 (2.75倍)
八戸	1968	八戸	EW	183 (1.02倍)

表5 設計目標

ξ	設計目標 (層間変形角)
1.0	1/100以下
0.5	1/200以下
0.2	非制御時の2/3以下

- ※¹¹制振装置なし($T_s=0.5$ [s], $h_s=0.02$)で応答加速度1000[gal]に正規化
- ※¹² $\xi=1.0$ は $C_0=1.0$ 相当の地震動に対応していると仮定

4.4 応答解析結果

4.4.1 基本応答特性

図9にBCJL2を入力地震動とした場合の時刻歴応答波形を示す。(a) $\xi=0.2$ と(b) $\xi=0.5$ の比較より、入力地震動の強さによらず能動制御力 f_c は最大値付近を推移しており、3章(2)①で述べたアルゴリズムによって制御ゲインが適切に更新されていることが確認できる。また、(c) $\xi=1.0$ では4秒付近でアクティブ・パッシブの切替が行われており、3章(2)②で述べたアルゴリズムによって制御力が一定の時間をかけて取り除かれていることが確認できる。また、層間変形は制御の有無でほぼ変わらない応答波形となっている。尚、他の入力地震動についてもほぼ同様の傾向が得られている。

図 10(a)-(d)に各入力地震動について応答低減の割合を示す。「制御あり」に着目すると、いずれの入力地震動に対しても $\xi=0.5$ 以下の範囲において、入力小さいほど制振性能が向上していることがわかる。また、「制御あり(切換あり)」ではアクティブ・パッシブ切換制御手法によって、比較的弱い入力に対してアクティブ、比較的強い入力に対してパッシブと、制御の切換が行われている。次項では、より詳細な検討を行う。

4.4.2 制御手法の有効性の検討

制御手法の有効性を確認するため、以下に示す①~⑤の検討項目についてそれぞれ検討を行った。

- ①制御の切換面が適切か($\xi=0.5$ と比較)
- ②設計目標を満たしているか(前頁表5)
- ③非制御時に対して応答を増加させることがないか
- ④制御に必要なとされる仕事率(≒電力)の値が過大となっていないか(建物規模との関係で判断)
- ⑤装置変形が過大となっていないか(現実的な値か)

表6は、上述した各項目について地震波ごとにまとめたものである。①より、想定した制御の切換面でアクティブ・パッシブの切換が行われていること、②より設計目標で想定した制振性能が得られていること、③より、応答値は常に「制御あり」≦「制御なし」を満たしていることが確認された。また、④より、制御に要する仕事率は建物重量が100[tonf]であることを考えれば比較的小さい値で十分な制振効果が得られていると考えられる。⑤より、AMD、HMD等では能動制御によって装置変形が過大となる問題が生じるが、回転慣性質量を利用した制振装置の場合、装置変形の値は極端に大きな値とならない。以上より、提案した制御手法は能動制御方式同調粘性マスダンパーを有する制振システムに対して概ね有効であると考えられる。

5.まとめ

- ①同調粘性マスダンパーにモーターを付加した制振装置を新たに考え、この制振装置を有する制振システムの設計における一つの考え方を提示した。
- ②可変ゲイン制御を応用したアクティブ・パッシブ切換制御手法の定式化を行い、複数の観点から有効性の検討を行った。
- ③提案した制御手法が能動制御方式同調粘性マスダンパーを有する制振システムに対して概ね有効であることが確認された。

【参考文献】

- 1) 齊藤・栗田・井上：慣性接続要素を利用した粘性ダンパーによる一質点構造の最適応答制御と Kelvin モデル化手法に関する考察, 構造工学論文集, Vol.53B, 2007.3
- 2) 齊藤・井上：慣性接続要素を利用した粘性ダンパーを持つ制振構造の最適応答制御に関する一考察 最適設計システムにおける線形粘性要素の等価非線形粘性要素への置換法, 日本建築学会技術報告集, Vol.13, No26, 2007.12
- 3) 長島・西山・篠崎：アクティブマスダンパーを用いた建物の振動制御(その2)装置能力の制約を考慮した可変ゲイン制御手法とその制御性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第483号, pp.39-49, 1996.5
- 4) 松岡, 砂子田, 平元, 山崎, 福喜：回転慣性質量を持つ電磁抵抗可変型ダンパーによる応答制御(その1~その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.619-626, 2008.9

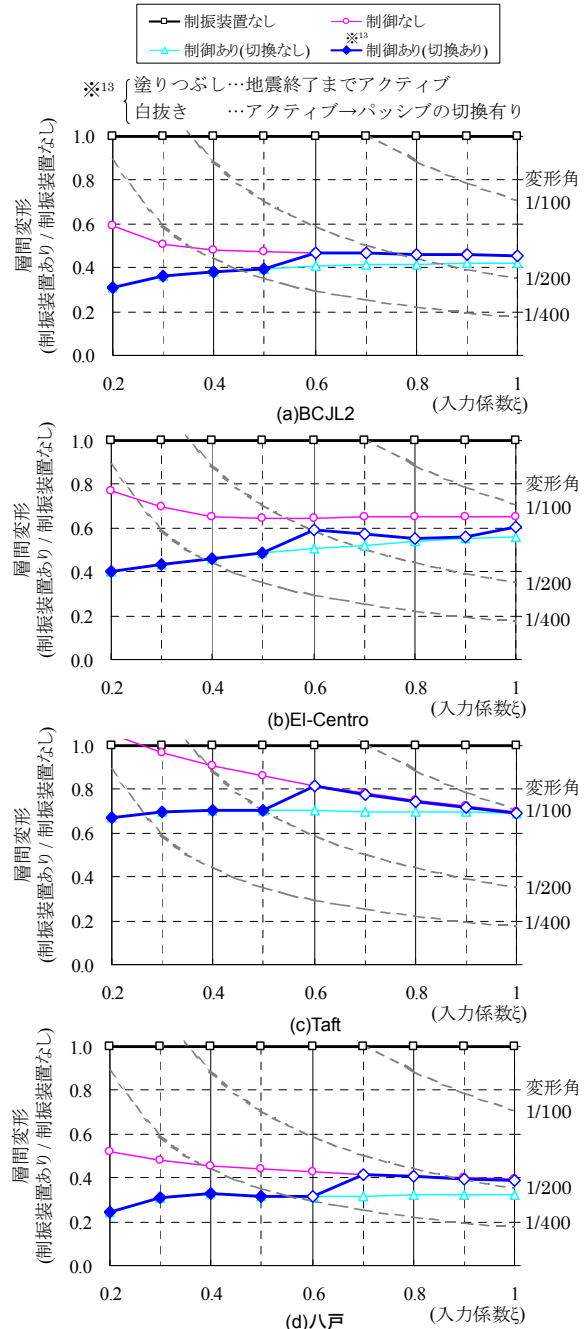


図 10 応答低減の割合(層間変形)

表 6 切換制御手法の有効性の検討

検討項目	① 切換面 $\xi=0.5$	②(前頁表5)		
		$\xi=0.2$ 制御/非制御 2/3以下	$\xi=0.5$ 層間変形 2.25[cm] _(1/200) 以下	$\xi=1.0$ 層間変形 4.5[cm] _(1/100) 以下
条件	$\xi=0.5$	2/3以下	2.25[cm] _(1/200) 以下	4.5[cm] _(1/100) 以下
BCJL2	0.5-0.6	0.52	1.26[cm]	2.87[cm]
El-Centro	0.5-0.6	0.52	1.53[cm]	3.82[cm]
Taft	0.5-0.6	0.64	2.22[cm]	4.38[cm]
八戸	0.5-0.6	0.46	1.00[cm]	2.47[cm]
検討項目	③ 制御/非制御 1.0以下	④ $\xi=0.2-1.0$ における最大値		⑤ 装置変形
		制御力	仕事率	
条件	1.0以下	過大でないこと		
BCJL2	1.0	2.5[tonf]	12.6[kW]	6.08[cm]
El-Centro	0.93	2.5[tonf]	17.7[kW]	8.28[cm]
Taft	1.0	2.5[tonf]	17.6[kW]	10.88[cm]
八戸	1.0	2.5[tonf]	11.4[kW]	5.25[cm]