

地震の地域性と揺れの大きさを考慮した免震構造物の応答評価に基づくセミアクティブ制御

福喜多 輝 高橋 正樹
(技術研究所) (慶應義塾大学)

Semi-Active Control for Isolated Structure Based on Response Evaluator of System Respected to the Regional Characteristics and Ground Motion of Earthquake

by Akira Fukukita and Masaki Takahashi

Abstract

This paper presents two different response evaluators which evaluate the response of the system and decide the control input to the system. The characteristics of the response evaluators are designed with the source region and ground motion of earthquake. They are applied to a base isolated structure with a semi-active oil damper whose damping coefficient has large or small values. The response evaluators are designed by the multi-layered neural network which consists of the building responses and the peak ground velocity as input data and switching signal for damping coefficient as output data. A genetic algorithm is used to adjust the neural network parameters which decide the performance of the response evaluators. A computer simulation is carried out using several kinds of earthquake motions, and absolute acceleration and displacement of each story which are trade off relations of each other are reduced to the intermediate value of the response in case where constant damping coefficients are large or small. From the result of simulations, the effectiveness of the response evaluators is verified.

概要

建物の応答を評価し、これを用いてダンパへの制御信号を決定する応答評価器を提案した。応答評価器の特性は地震の震源や地面の揺れから決定される。減衰係数が 2 段階に切り替え可能なセミアクティブオイルダンパを備えた免震建物にこの応答評価器を適用した。応答評価器は入力層に建物の応答値と地表の最大速度の値、出力層に減衰係数の切り替え信号を持つ階層型ニューラルネットワークによって設計されている。また、応答評価器の性能を決定するニューラルネットワークのパラメータ調整には遺伝的アルゴリズム(GA)を適用した。数種類の地震動に対するシミュレーションの結果、トレードオフの関係にある建物各層の絶対加速度と層間変形を、減衰係数を大小どちらかに一定にした場合に比べてともに中間値に低減できることがわかった。以上より、提案した応答評価器は様々な地震動に対する建物の応答低減に効果的であることが明らかとなり、その有用性が検証された。

§ 1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震で、上部構造の応答低減効果を発揮することが実証された免震構造物は、以来、飛躍的に適用件数が増加し、様々な種類の免震装置が開発されている。免震装置はアイソレータである積層ゴムと減衰機構である各種ダンパの組み合わせで構成されることが多い。免震性能の向上を目的として、 H^{∞} 制御理論や最適制御理論を用いたアクティブ免震に関する研究も行われているが¹⁾²⁾、建物全体をアクティブに制御するには大きな外部エネルギーを必要とする。そこで、近年では、より現実に即した方法としてセミアクティブ制御手法が注目を集め、実建物に適用されて

いる³⁾⁴⁾。

セミアクティブ免震に関する研究では、免震層に設置したダンパの減衰力を可変にしたものが多く、吉田ら⁵⁾のオイルダンパの減衰係数を双線形最適制御理論に基づき時々刻々変化させる研究、長島⁶⁾らの免震層の過大な変形を抑制する研究などがある。新しいデバイスを使用した例としては、MR ダンパの減衰係数をゲインスケジュールド制御により決定する研究⁷⁾、ピエゾアクチュエータや超磁わいアクチュエータ駆動の油圧システムを用いた可変摩擦ダンパを利用した研究などがある⁸⁾⁹⁾。また、建築構造物の振動制御において、アクティブ動吸振器の制御系設計、入力地震動の予測、構造物の同定にニューラルネットワークやファジィ理

論を適用した研究^{10)~13)}も行われている。

一方、気象庁が一般運用を開始した緊急地震速報は、地震が発生した際に、震源に近い観測点のデータを基に震源位置と地震の規模を推定し、この情報を配信する仕組みである。その結果、震源と観測点の位置関係によっては対象となる地域において、地震による揺れが到達する前に速報の情報を受信することができ、現在までにいくつかの地震においてその有用性が確認されている¹⁴⁾。また、緊急地震速報による地震の揺れまでの時間差を利用して、学校、工場、建設現場などで人間の安全確保や生産ラインの停止など、地震による被害を少しでも軽減するための様々な取り組み、利用方法の検討が行われ始めている^{15)~17)}。さらに、緊急地震速報の精度や信頼性の向上に関する研究¹⁸⁾も行われていることから、今後はこの仕組みを用いた制御システムの構築に意義があると考えられる。

システムに対する制御方法として、従来のシステムの制御は、モデルベースの制御系の場合、**図-1(a)**に示すようにシステムの出力と観測器からの状態推定値を比較した誤差がフィードバックされる構成になっていた。この場合、想定した範囲内のパラメータの誤差や非構造化誤差などについては、適応制御やロバスト制御によって良好な制御効果が得られるが、センサやアクチュエータの異常には対応できなかった。そこで、吉田ら¹⁹⁾は、**図-1(b)**に示すような従来のモデルベースの制御では使用していなかったシステムの出力と観測器の推定値の誤差を積極的に評価する誤差評価器を提案している。また、モデルベースの制御系でない場合は、誤差評価器の代わりに**図-1(c)**に示すようなシステムの状態を観測し、その出力であるシステムの応答の情報に基づいて、制御目標を満たすようにコントローラの変化させる応答評価器を提案している。

従来の地震に対する建物の振動制御では、想定した地震動の大きさや周期特性に対しては制御効果を得られていたが、想定と異なる地震動に対してはその効果が十分に発揮されないという問題点があった。

そこで、本研究では、吉田らの応答評価器を用いたシステム制御の概念に、近年運用が開始されその有用性が示されつつある緊急地震速報の情報をを用いて、様々な特性をもつ地震動に対して応答低減効果を発揮できる新たな制御手法を提案する。

本論文では、実用的かつ安全性を確保できるセミアクティブ免震をめざし、免震層に減衰係数を2段階に切り替えることが可能なオイルダンパの使用を想定したセミアクティブ免震の制御性能について検討を行う。具体的には、システムの応答を評価する応答評価器を導入し、その評価に基づいて減衰係数の切り替えを行うセミアクティブ制御を行う。制御系設計の方針とし

て、地震動の種類によらず建物の応答低減効果が得られるシステムを基本とし（以後、標準型と呼ぶ）、加えて震源位置や規模といった地震の情報をあらかじめ得られる場合にはさらに制御性能の向上をめざすこととして（以後、発展型と呼ぶ）、全体システムを構築した。標準型²⁰⁾は、外乱である地震動の情報をを用いることなく、システムの状態を評価して自律的に減衰係数の切り替えを行うシステムである。これにより、システムの情報に基づいた制御系が構築されるため、外乱（地震動）の特性に影響を受けにくい制御が可能となることが期待される。発展型²¹⁾は、緊急地震速報から得られる震源位置と地震の規模の情報を活用するシステムであり、制御性能の向上を図るものである。震源位置の近い地震は、最大振幅やスペクトル特性などに類似の傾向が見られることが指摘されている^{22) 23)}ことから、震源位置によって地震をいくつかの領域に分け、その領域ごとに制御器を設計する。また、緊急地震速報の情報をを用いて建物当該地の地表の最大速度を推定することが可能なことから、制御器の設計にあたっては、地表の最大速度に応じたシステムの応答評価を行う。以上、標準型と発展型を併せたシステムにより、地震の地域性と揺れの大きさを考慮した新たな応答評価手法を実現した。

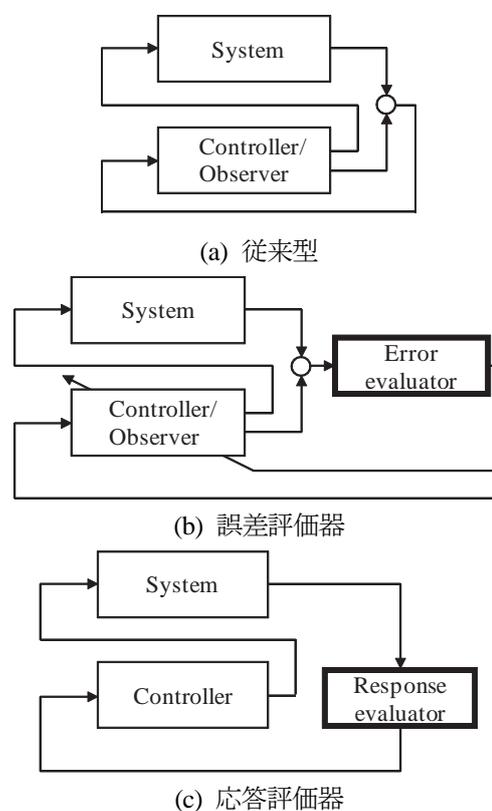


図-1 制御システム

§ 2. 免震構造物のモデル化と定式化

2.1 建物のモデル化

本論文では、最下層に天然ゴム系積層ゴムと減衰係数を切り替え可能なオイルダンパを設置した、10階建ての免震構造物を解析対象とした。図-2にモデル図を示す。免震層は上部建物を1質点系とみなした時のオイルダンパなしの状態での固有周期を3.9秒、減衰定数を2%とし、線形とした。また、上部建物は線形の等価せん断モデルとし、減衰定数は建物の内部粘性減衰として上部建物のみでの1次固有周期に対して2%とした。免震構造物の諸定数を表-1に示す。

2.2 オイルダンパのモデル化

次に、オイルダンパの減衰特性を図-3に示す。このダンパは、弁の開度を調整してHardおよびSoftの2段階に減衰係数を切り替えることが可能であり、どちらの場合もダンパの減衰力が約640kNでリリースされるような機構が設けられている。オイルダンパのモデル化に際しては、ばねとダッシュポットを直列に接続したMaxwellモデルとした。オイルダンパ1台あたりのMaxwellモデルのばね剛性は $k_s = 29.4 \times 10^6 \text{ N/m}$ とした。また、減衰係数を切り替える際に時間遅れが生じるため、コントローラからの指令値に対する実効値の応答を次式に示す1次遅れ要素でモデル化した。

$$G_d(s) = \frac{1}{Ts + 1} \quad (1)$$

ただし、時定数は $T = 30 \text{ msec}$ とした。図-4に時間遅れの様子を示す。以上の特性を持つオイルダンパを免

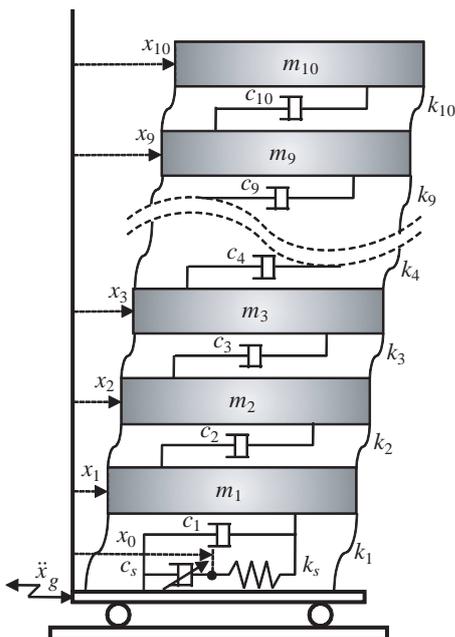


図-2 解析モデル

震層に6台設置するものとした。

2.3 運動方程式と状態方程式

前節までの建物およびオイルダンパのモデル化により、図-2の免震構造物モデルの運動方程式は次のように表される。

$$c_s(t)\dot{x}_0(t) - k_s(x_1(t) - x_0(t)) = 0 \quad (2)$$

$$m_1(\ddot{x}_1(t) + \ddot{x}_g(t)) + (c_1 + c_2)\dot{x}_1(t) + (k_s + k_1 + k_2)x_1(t) - c_2\dot{x}_2(t) - k_s x_0(t) - k_2 x_2(t) = 0 \quad (3)$$

表-1 解析モデルの諸元

層	質量 ($\times 10^3 \text{ kg}$)	ばね定数 ($\times 10^6 \text{ N/m}$)	減衰係数 ($\times 10^6 \text{ Ns/m}$)
10	2499	996	8.5
9	2066	1156	8.3
8	2037	1381	9.9
7	2036	1568	10.3
6	2050	1813	10.8
5	2033	1803	10.9
4	1826	1979	13.0
3	2490	2763	19.3
2	3438	2273	12.6
1	4981	66	1.8

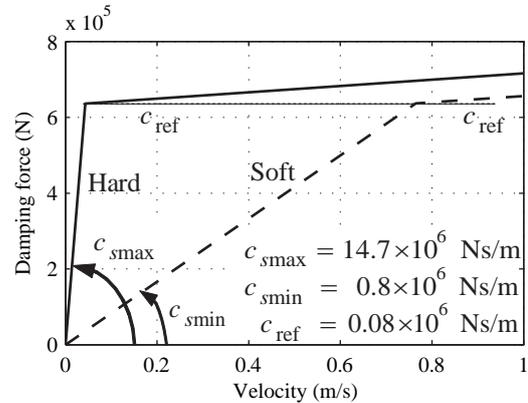


図-3 オイルダンパの特性

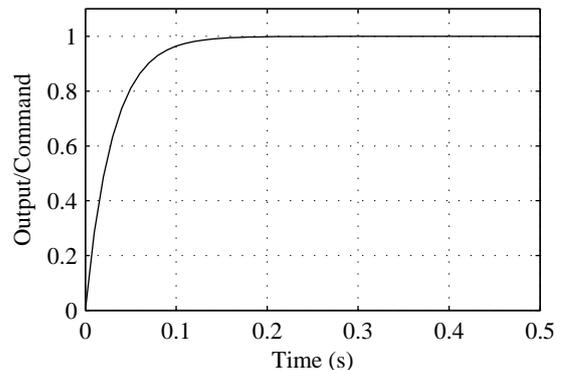


図-4 オイルダンパの時間遅れ

$$m_i (\ddot{x}_i(t) + \ddot{x}_g(t)) + (c_i + c_{i+1}) \dot{x}_i(t) + (k_i + k_{i+1}) x_i(t) - c_i \dot{x}_{i-1}(t) - c_{i+1} \dot{x}_{i+1}(t) - k_i x_{i-1}(t) - k_{i+1} x_{i+1}(t) = 0 \quad (i = 2 \sim 9) \quad (4)$$

$$m_{10} (\ddot{x}_{10}(t) + \ddot{x}_g(t)) + c_{10} \dot{x}_{10}(t) + k_{10} x_{10}(t) - c_{10} \dot{x}_9(t) - k_{10} x_9(t) = 0 \quad (5)$$

ここで、 m_i, c_i, k_i はそれぞれ建物各層の質量、減衰係数、ばね定数であり、 c_s, k_s は Maxwell モデルの減衰係数、ばね定数を表す。また、 $\ddot{x}_g(t)$ は地動加速度を表す。

状態量として、Maxwell モデルでモデル化したオイルダンパの軸変位 $x_0(t)$ 、各層の地面からの相対変位 $x_i(t)$ 、相対速度 $\dot{x}_i(t)$ をとり、上記の運動方程式を状態方程式で表現すると、次式ようになる。

$$\dot{x}_s(t) = A_s x_s(t) + B_s \{x_1(t) - x_0(t)\} u(t) + D_s \ddot{x}_g(t) \quad (6)$$

$$u(t) = \frac{1}{c_s(t)} \quad (7)$$

$$x_s(t) = [x_0(t) \ x_1(t) \ \cdots \ x_{10}(t) \ \dot{x}_1(t) \ \cdots \ \dot{x}_{10}(t)]^T$$

以上より、対象とする建物モデルは、制御入力 $u(t)$ にかかる項が状態量の一部の関数となることが特徴である、非線形システムになる。

§ 3. 応答評価器の制御系設計

不規則振動である地震動による免震構造物（システム）の応答を評価するため、非線形性を取り扱うことが可能な階層型ニューラルネットワークを用いて応答評価器を設計する。応答評価器の設計には、免震層変位と建物の絶対加速度の応答、地表の最大速度を応答評価器の入力として使用し、出力であるオイルダンパの減衰係数を決定した。本制御では、許容される範囲において免震層の変位を許し、建物の絶対加速度の応答低減をめざしている。減衰係数は大きい値（以後、**Hard**）、または小さい値（以後、**Soft**）を選択できるものとした。減衰係数を **Hard** または **Soft** で一定として切り替えない場合と比較して、トレードオフの関係にある免震層の変位と建物の絶対加速度をともに **Hard** と **Soft** の中間値に低減できることを示し、応答評価器の有効性を示す。本論文では、2通りの応答評価器の設計を行った。1つは、地震動の種類によらず建物の応答低減効果を得られる標準型、もう1つは、緊急地震速報を利用して地震の発生位置、規模の情報を制御系設計に取り入れ性能向上をめざした発展型である。それぞれの設計について、使用した地震動、設計方法について述べる。

表-2 解析に用いた地震動（標準型）

No.	Earthquake	Direction	Year	Max. Acc. (cm/s ²)	Teaching data
1	El Centro	NS	1940	511	○
2	Taft	EW	1952	497	○
3	Hachinohe	NS	1968	330	○
4	JMA Kobe	NS	1995	818	
5	BCJ Level 2	—	—	356	

3.1 制御系設計に用いた地震動

3.1.1 標準型

表-2のNo.1~No.3の特性の異なる地震動を用いて制御系設計を行い、様々な種類の地震動に対して制御効果が出ることをめざした。また、設計に用いていないNo.4、No.5の地震動の場合の応答解析を行い、制御性能を確認した。

3.1.2 発展型

震源位置の近い地震は、最大振幅やスペクトル特性などに類似の傾向が見られることが指摘されている²²⁾ことから、震源位置によって地震をいくつかの領域に分け、その領域ごとに制御器を設計することとした。検討に用いた地震動は、表-3に示す、約25年間に当社技術研究所（東京都江東区越中島）で観測した地震記録である。震源位置が比較的近く、スペクトル特性が似ている地震の発生域をいくつかの領域に分け、その領域内での代表地震動を決定した。この代表地震動を後述する領域ごとに応答評価器を設計する際に用いることとした。領域分けおよび地震動の選定については以下のルールで行った。地震観測点に免震のモデル建物があるという想定で、観測点を中心とした半径500km以内で発生した地震のうち、観測点において水平2成分のうちどちらか一方の最大加速度が10cm/s²以上、かつ最大速度が1cm/s以上の記録を抽出した。これらを地震の発生位置に応じて、図-5に示す8つの領域に分けた（領域5は省略）。各領域内で、(1)最大加速度または最大速度が大きいもの、(2)ノイズが少なく記録が良好なもの、(3)スペクトル特性に極度な偏りのないもの、を基準として代表地震動を選定した。表-3に代表地震動（○印）および各領域に属する地震動の諸元を示す。

3.2 階層型ニューラルネットワーク

3.2.1 標準型

図-6に示す、入力層、中間層、出力層の3層構造の階層型ニューラルネットワークを用いて応答評価器の設計を行い、式(7)のダンパの減衰係数 $c_s(t)$ を決定する。図中の○印がユニットを表し、各ユニットを結ぶ線分がユニット間の結合の強さを表す。入力層は免震

表-3 解析に用いた地震動（発展型）

Region	year/date/time	Lat. (deg)	Long. (deg)	Depth (km)	Mag. M_J	Epicentral dist. (km)	Direction	Acc (cm/s^2)	Vel (cm/s)	Δt (sec)
○ 1	2005/0816/1146	38.148	142.277	42	7.2	353	EW	36.55	5.03	0.01
○ 2	1987/0206/2216	36.965	141.893	35	6.7	237	NS	12.21	1.68	0.01
2-1	1987/0407/0940	37.303	141.863	44	6.6	260	NS	14.40	1.91	0.01
2-2	1996/0217/0022	37.308	142.547	58	6.8	307	EW	11.34	1.05	0.01
○ 3	2005/0411/0722	35.727	140.620	52	6.1	74	EW	18.59	2.51	0.01
3-1	1989/0306/2339	35.697	140.710	56	6.0	82	EW	11.85	2.11	0.02
3-2	1990/0601/1022	35.645	140.727	59	6.0	84	EW	10.63	1.37	0.01
3-3	2000/0603/1754	35.688	140.745	48	6.1	86	EW	13.55	1.98	0.01
○ 4	1997/0323/1458	35.968	140.107	71	5.1	44	EW	41.06	4.56	0.01
4-1	1983/0227/2114	35.940	140.152	72	6.0	44	EW	80.52	13.33	0.03
4-2	1989/0219/2127	36.022	139.905	55	5.6	41	EW	22.82	2.75	0.02
4-3	1995/0107/2134	36.302	139.977	71	5.4	73	EW	21.08	1.84	0.01
4-4	2004/1006/2340	35.988	140.088	66	5.7	45	NS	37.75	5.38	0.01
4-5	2005/0216/0446	36.038	139.888	46	5.3	43	EW	22.70	1.77	0.01
○ 6	2005/0723/1634	35.582	140.138	73	6.0	32	EW	49.65	8.85	0.01
6-1	1999/0913/0756	35.597	140.158	76	5.1	33	EW	24.66	2.25	0.01
6-2	2006/0831/1718	35.632	140.023	76	4.8	20	EW	15.62	1.54	0.01
○ 7	2004/1023/1756	37.292	138.867	13	6.8	200	NS	17.83	2.80	0.01
7-1	2004/1023/1834	37.305	138.930	14	6.5	199	NS	19.29	2.95	0.01
7-2	2004/1027/1040	37.292	139.033	12	6.1	194	NS	9.26	1.48	0.01
○ 8	1993/1012/0054	32.028	138.240	391	6.9	428	EW	23.55	2.06	0.01
8-1	1989/0617/0842	31.893	138.342	385	6.6	439	NS	14.59	1.48	0.01
○ 9	1984/0101/1803	33.623	136.838	388	7.0	353	NS	26.79	2.76	0.04

層の変位と建物最上階の絶対加速度の2ユニット、中間層は5ユニット、出力層はダンパの減衰係数選択のための切り替え信号の1ユニットである。ダンパの減衰係数の決定については、様々な種類の地震動に対応できるように、入力地震動の性質による影響をなるべく受けないようにするため、建物の応答の情報のみを使用することにした。各層の計算方法を以下に示す。

$$\text{入力層: } O_{pi} = X_{pi}, \quad i = 1, 2, \dots, n_i \quad (8)$$

$$\text{中間層: } u_{pj} = \sum_{i=1}^{n_i} w_{ji} O_{pi} + \theta_j, \quad j = 1, 2, \dots, n_j \quad (9)$$

$$O_{pj} = f_h(u_{pj}) \quad (10)$$

$$\text{出力層: } u_{pk} = \sum_{j=1}^{n_j} w_{kj} O_{pj} + \theta_k, \quad k = 1, 2, \dots, n_k \quad (11)$$

$$O_{pk} = f_o(u_{pk}) \quad (12)$$

$$\text{入出力関数: } f_h(x) = \frac{2}{1 + \exp(-2x)} - 1 \quad (13)$$

$$\text{入出力関数: } f_o(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \quad (14)$$

ここで、 w は結合重み、 θ はしきい値を表す。

3.2.2 発展型

非定常かつ小～大振幅の様々な特性を持つ地震動に対して、なるべく少ない数の制御器で制御効果を発揮

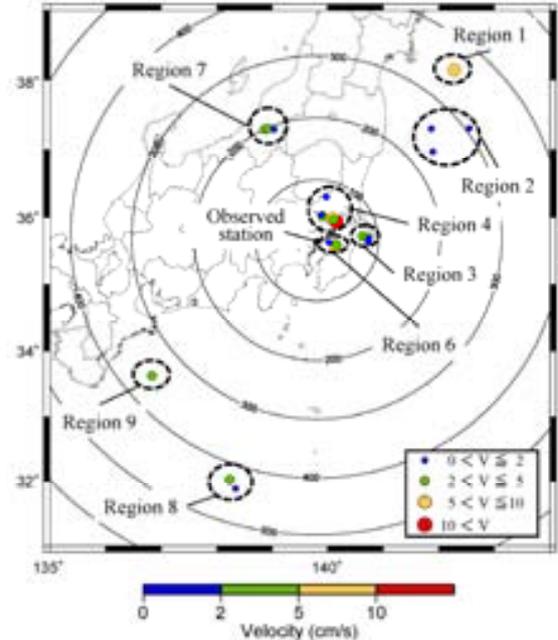
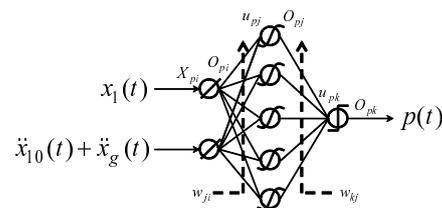


図-5 震源位置と観測点における地表最大速度（発展型）



○: Linear Neuron ⊖: Sigmoid Neuron ⊕: Threshold Neuron

図-6 階層型ニューラルネットワーク（標準型）

するような制御器を設計するために、図-7に示す入力層、中間層、出力層の3層構造の階層型ニューラルネットワークを用いて応答評価器の設計を行い、式(7)のダンパの減衰係数 $c_s(t)$ を決定する。入力層は、建物の応答を評価するための免震層の変位・速度、全層の絶対加速度と、緊急地震速報の情報を基に得られる地表の最大速度の計13ユニット、中間層は5ユニット、出力層はダンパの減衰係数選択のための切り替え信号の1ユニットである。各層の計算方法は式(8)~(14)に示した内容と同様である。入力層に地表の最大速度を用いることにより、式(9)における θ_j が変わるため、中間層におけるニューロンの発火条件が変わり、最大速度に応じたシステム応答評価によるダンパの減衰係数の切り替えが期待される。

3.3 学習方法

本研究では、入力層から出力層までの階層型ニューラルネットワークの結合重み w としきい値 θ のパラメータ調整は明示的な教師を与えることが困難である。そこで、これらのパラメータの調整には、代表的な最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズム Genetic Algorithm (GA)を用いて、あらかじめ設定した評価関数を満たすように結合重み w を決定する。その際に、免震層の最大変位など制御系を構築する際に考慮すべき制約に関しては、ペナルティを与える形で学習段階に考慮するものとする。

3.3.1 標準型

各層間の結合重み w としきい値 θ をコード化した染色体を1個体として、40個体準備する。そして、1個体に対して、次式に示す評価関数に基づいて適応度を算出する。

$$f_{fit}(x) = \sum_{i=1}^3 f_{pi} \frac{1}{(\ddot{x}_{i0} + \ddot{x}_g)_{i\max}} \quad (15)$$

ここで、 i は学習に用いる地震動の数を示し、表-2に示す No.1~No.3 の地震動をレベル2 (最大速度: 50cm/s) に基準化した波形を用いた。また、未学習の地震動に対する応答低減効果を述べるために No.4、No.5 の地震動 (Kobe のみ原波) を用いた。式(15)中の f_p は免震層変位に関するペナルティ関数であり、設定した変位制限 x_{lim} を超えた場合には、評価が低くなるように設定してある。ここでは、 $x_{lim} = 26\text{cm}$ とした。

$$f_p = \begin{cases} 0.01 & |x_1| \geq x_{lim} \\ 1 & |x_1| < x_{lim} \end{cases} \quad (16)$$

40個体に対して適応度の計算を行い、エリート保存戦略により4個体、ルーレット戦略により8個体、次世

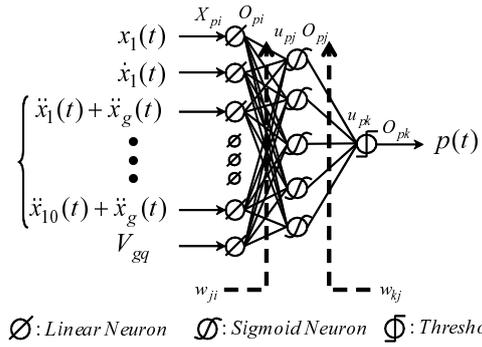


図-7 階層型ニューラルネットワーク (発展型)

代の親となる個体を選択する。これらの親の中でランダムにペアリングを行い、一様交叉と突然変異を行い、次世代の18個体を生成する。さらにランダムに10個体を生成する。この手順を一代として繰り返し行い、より適応度が高い個体を探索した。なお、学習の終了条件は50世代とした。

階層型ニューラルネットワークによる応答評価器の出力を $p(t)$ とすると、 $p(t)$ は0または1を出力し、ダンパの減衰係数 $c_s(t)$ は次式によって決定される。

$$c_s(t) = (1 - p(t))c_{s\max} + p(t)c_{s\min} \quad (17)$$

$$p(t) = 0 \text{ or } 1 \quad (18)$$

ここで、 $c_{s\max}$ 、 $c_{s\min}$ は2.2節で述べたオイルダンパのHardまたはSoftの減衰係数である。すなわち、式(18)によってダンパの減衰係数としてHardまたはSoftのどちらかが選ばれることになる。本研究では、常時は風揺れ防止も考慮してHardで待機するものとし、学習によって必要なときにSoftに移行するものとした。

3.3.2 発展型

はじめに、ダンパの減衰係数がSoftおよびHardで一定の場合に対して、表-1に示す各領域の代表地震動を用いて、レベル1, 2, 3 (最大速度をそれぞれ25, 50, 75cm/sで基準化) としたときの応答解析を行い、免震層の最大変位と最大速度、建物各層の最大加速度を求めた。これを入力層の正規化とペナルティ関数の判定条件に用いた。

次に、入力層に与える情報としては、絶対値で評価せずに、応答解析で最大となる、レベル3・Soft時の免震層の最大変位、レベル3・Hard時の免震層の最大速度、およびレベル3・Hard時の各層の最大加速度で正規化した値を用いた。また、地震動の最大速度 V_{gq} は、25, 50, 75cm/sの3通りであり、 q を学習に用いる地震動のレベルとすると、 $q=1, 2, 3$ はレベル1, 2, 3の地震動に対応している。

これらの値を用いて標準型と同様に学習を行う。図

の各層間の結合重み w としきい値 θ をコード化した染色体を 1 個体として、40 個体準備する。絶対加速度および免震層変位の両方を低減することが目標であることから、次式に示す評価関数に基づいて適応度 $f_{fit}(x)$ を算出する。

$$f_{fit}(x) = \sum_{q=1}^3 f_{fitq}(x) \quad (19)$$

$$f_{fitq}(x) = \frac{f_{paq}}{(\ddot{x}_{10} + \ddot{x}_g)_{q\max}} \times \frac{f_{pdq}}{(x_1)_{q\max}} \quad (20)$$

式(19)に示すように、レベル 1, 2, 3 を総合的に評価することにより、それ以外の振幅レベルの地震動に対してもニューラルネットワークの汎化能力により制御性を発揮することが期待される。また、式(20)の f_{paq} , f_{pdq} は、最上階の絶対加速度および免震層変位に関するペナルティ関数であり、それぞれのレベルにおいて設定した制限値を超えた場合には評価が低くなるように次式のように定めた。

- 加速度のペナルティ関数

$$f_{paq} = \begin{cases} 1 & \left[A_q < (\ddot{x}_{10} + \ddot{x}_g)_{q\max}^s \right] \\ 0.4 & \left[(\ddot{x}_{10} + \ddot{x}_g)_{q\max}^s \leq A_q < (\ddot{x}_{10} + \ddot{x}_g)_{q\max}^h \right] \\ 0.1 & \left[(\ddot{x}_{10} + \ddot{x}_g)_{q\max}^h \leq A_q \right] \end{cases}$$

$$A_q = (\ddot{x}_{10} + \ddot{x}_g)_{q\max} \quad (21)$$

- 免震層変位のペナルティ関数

$$f_{pdq} = \begin{cases} 1 & \left[D_q < (x_1)_{q\max}^h \right] \\ 0.6 & \left[(x_1)_{q\max}^h \leq D_q < (x_1)_{q\max}^s \right] \\ 0.2 & \left[(x_1)_{q\max}^s \leq D_q \right] \end{cases} \quad (22)$$

$$D_q = (x_1)_{q\max}$$

ここで、式(21)、式(22)の添え字 s, h は、それぞれ減衰係数が **Soft**, **Hard** の場合を示す。式(21)、式(22)では、ダンパの減衰係数が一定のときの代表地震動のレベル 1, 2, 3 に対する建物応答結果を、ペナルティ関数の判定条件として利用している。

以上の式を用いて、個体に対して適応度の計算を行い、エリート保存戦略により 4 個体、ルーレット戦略により 8 個体、次世代の親となる個体を選択する。これらの親の中でランダムにペアリングを行い、一様交

又と突然変異を行い、次世代の 18 個体を生成する。さらにランダムに 10 個体を生成する。この手順を一代として繰り返し行い、より適応度が高い個体を探索した。なお、学習の終了条件は 200 世代とした。

階層型ニューラルネットワークによる応答評価器の出力を $p(t)$ とすると、ダンパの減衰係数 $c_s(t)$ は式(17)、式(18)によって決定される。

§ 4. シミュレーション

標準型、発展型のそれぞれの応答評価器についてシミュレーションにより制御性能を検証した。また、これらの結果をふまえて、システムとしての考え方についてまとめる。

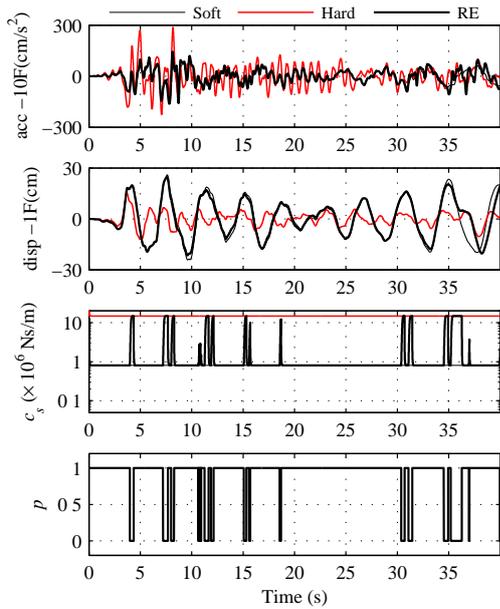
4.1 学習波に対する結果

4.1.1 標準型

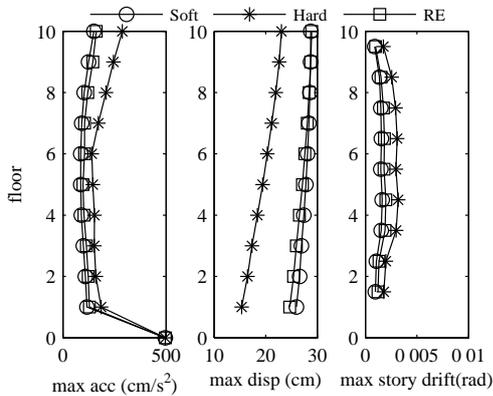
学習に使用した表-2の Taft EW(1952)を入力地震動とした場合の最上階の絶対加速度、免震層変位、減衰係数、切り替え信号の波形、および各層の絶対加速度、地面からの相対変位、層間変形角の最大値分布を図-8に示す。図中の凡例 **RE** は応答評価器による切り替えの場合を示す。図-8(a)より、応答評価器により、切り替え信号 $p(t)$ は $p(t)=0$ (**Hard**) または $p(t)=1$ (**Soft**) となり、それに伴って減衰係数 $c_s(t)$ は、 $p(t)=0$ (**Hard**) の時は大きい値、 $p(t)=1$ (**Soft**) の時は小さい値に切り替わっている様子がわかる。加速度振幅が大きい時には、学習によって免震層変位の許容範囲でなるべく絶対加速度を低減するために減衰係数を **Soft** にし、免震層変位が大きい時には、免震層変位が過度に大きくなるように、減衰係数を **Hard** にして免震層変位を低減するような、設計に基づいた切り替えを行っている様子がわかる。この切り替えによって、絶対加速度は **Hard** に比べて、免震層変位は **Soft** に比べて低減できていることがわかる。また、図-8(b)より、減衰係数が切り替わることにより、減衰係数を **Hard** で一定にした場合に比べて、各層の絶対加速度、層間変形角が低減して **Soft** に近づいていること、**Soft** に比べて免震層の変位を含めた各層の相対変位が低減して **Hard** に近づいている様子がわかる。すなわち、トレードオフの関係にある絶対加速度、相対変位を応答評価器による減衰係数の切り替えによって、**Hard** と **Soft** の中間値に低減できることがわかる。

4.1.2 発展型

各領域において、表-3の代表地震動の場合についてシミュレーションを行った。結果の一例として、領



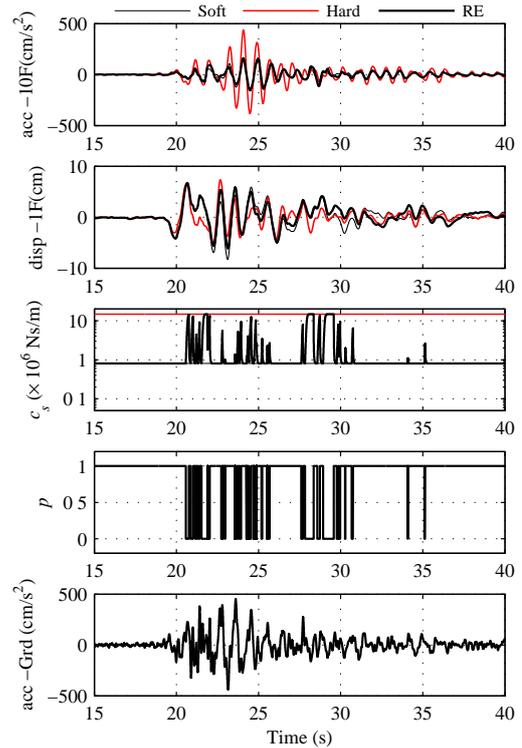
(a) 応答波形



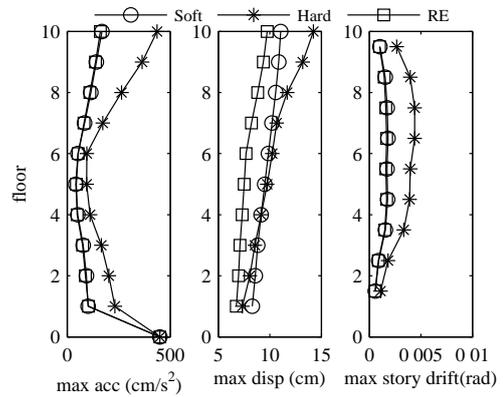
(b) 最大値分布

図-8 Taft 波に対する制御効果

域 4 におけるレベル 2 の地震動の場合の最上階の絶対加速度、免震層変位、減衰係数、切り替え信号、地震動の加速度波形、および各層の絶対加速度、地面からの相対変位、層間変形角の最大値分布を図-9 に示す。図中の凡例 RE は応答評価器による切り替えの場合を示す。標準型の場合と同様に、応答評価器により、切り替え信号 $p(t)$ の変化に伴って減衰係数 $c_s(t)$ が切り替わっている様子がわかる。また、応答評価器により、最上階の最大加速度を Soft よりも小さく、かつ免震層変位を含む各層の相対変位、層間変形角を Hard よりも小さくできており、セミアクティブ制御により減衰係数一定の場合に比べて制御性能が向上している。なお、領域、地震動のレベルが異なる例についても検討しており、同様の結果が得られている。



(a) 応答波形



(b) 最大値分布

図-9 領域 4(レベル 2)波に対する制御効果

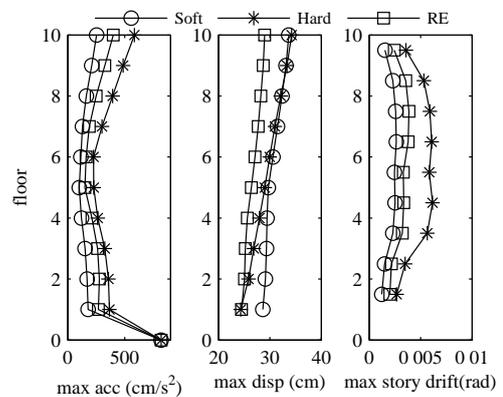


図-10 Kobe 波に対する制御効果

4.2 未学習波に対する結果

4.2.1 標準型

学習に用いていない表-2のJMA Kobe NS (1995)を入力地震動として用いた場合の最大値分布を図-10に示す。未学習の地震動が入力された場合でも、学習波の場合と同様に減衰係数をHardまたはSoftで一定にした場合に比べて各層の絶対加速度、相対変位、層間変形角が中間値に低減され、効果の傾向も同様であることがわかる。

4.2.2 発展型

1) 同一領域内の地震動の場合

学習に使用した地震動と同じ領域内の別の地震動(表-3の○がついていない地震動)に対して、応答評価器がどの程度対応できるかについて検討した。一例として、領域4において、表-3の地震動4-2(レベル2)のときの各層の絶対加速度、相対変位および層間変形角の最大値分布を図-11に示す。図-9(b)の学習波の場合に比べて、制御性能がやや低下するが、絶対加速度、相対変位、層間変形角ともにSoftとHardの中間値におさまっている。また、この傾向は他の領域においても同様であることを確かめている。

2) 違う領域の地震動の場合

次に、学習に使用した地震動とは違う領域の地震動に対する検討を行った。一例として、領域4で設計した応答評価器に領域1の地震動(表-3の地震動1、レベル2)が入力されたときの最大値分布を図-12に示す。また、比較のため、領域1の地震動で設計した応答評価器で制御した場合を図-13に示す。これらの図より、地震動に対応した応答評価器を用いた場合に比べて、対応していない応答評価器を用いると、最大応答が大きくなっており、制御性能が悪化していることがわかる。

4.3 シミュレーションのまとめ

標準型、発展型の2つの制御系設計について学習波、未学習波のそれぞれに対して制御効果の検討を行った。

まず、標準型の結果は、学習波、未学習波ともに減衰係数を切り替えることで、制御目標である減衰係数をSoftまたはHardで一定とした場合に比べて、トレードオフの関係にある各層の絶対加速度と免震層変位をともに中間値に抑えることができた。

次に、発展型の結果を各領域で設計した応答評価器と代表地震動(表-3の○)の組み合わせでシミュレーションを行い、絶対加速度と免震層変位の最大値から、以下の基準に従って制御性能を表-4にまとめた。

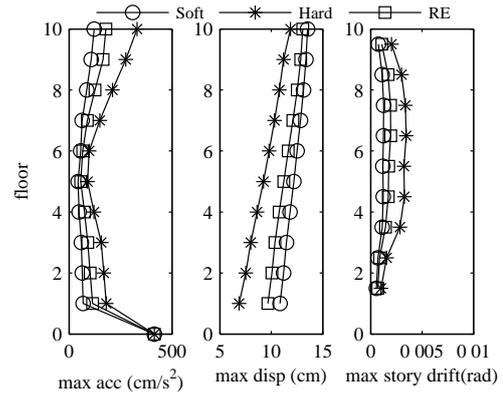


図-11 地震動4-2(レベル2)波に対する制御効果

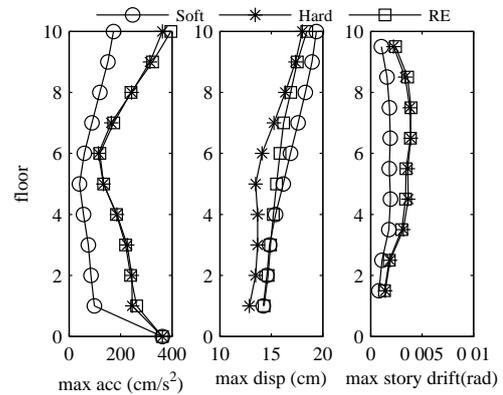


図-12 地震動1(レベル2)波を領域4で設計した応答評価器で制御した場合の効果

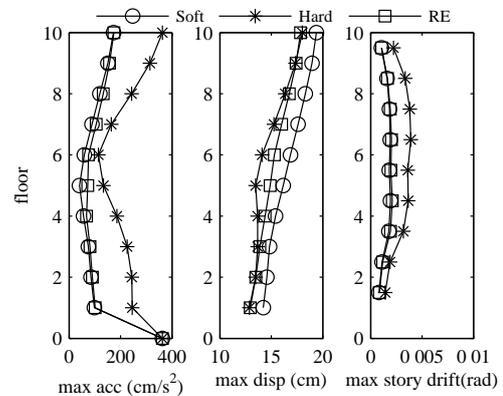


図-13 地震動1(レベル2)波を領域1で設計した応答評価器で制御した場合の効果

- ◎: 免震層変位がHardを下回る場合、いずれかの層の加速度がSoftを下回る場合
- : 免震層変位、全層の加速度がHardとSoftの中間値の場合
- △: 免震層変位、各層の加速度がSoftとほぼ同じ場合、または切り替えがほとんど起きない場合
- ▲: 免震層変位がSoftと同等だが、加速度がSoftを上回る場合

表-4 シミュレーションのまとめ (発展型)

Earthquake	Response evaluator															
	Region 1		Region 2		Region 3		Region 4		Region 6		Region 7		Region 8		Region 9	
	acc.	disp.	acc.	disp.	acc.	disp.	acc.	disp.	acc.	disp.	acc.	disp.	acc.	disp.	acc.	disp.
Region 1	◎	◎	▲	△	×	◎	×	△	△	△	×	◎	▲	△	△	△
Region 2	×	○	◎	○	×	○	×	○	×	○	×	○	○	○	○	○
Region 3	○	○	▲	△	◎	◎	○	◎	○	○	○	○	○	○	△	△
Region 4	○	○	▲	×	▲	△	◎	◎	△	△	▲	×	▲	×	△	△
Region 6	○	◎	▲	△	▲	×	×	×	○	○	▲	×	▲	△	▲	△
Region 7	×	○	○	○	▲	×	×	○	×	○	◎	○	×	○	○	○
Region 8	▲	△	○	○	▲	×	▲	△	▲	△	▲	×	○	○	○	○
Region 9	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○

×: 免震層変位が Soft の値を上回る場合、いずれかの層の加速度が Hard の値を上回る場合

表-4 より、領域に応じて応答評価器を設計している (学習している) 場合は、制御性能がよくなっている (表-4 の対角項)。また、振幅レベルの異なる地震動に対しても制御性能が確保できることを確認した。次に、応答評価器の設計と同じ領域の設計に用いていない地震動 (学習していない地震動) の場合でも、制御性能を確保できることを確認した。以上から、地震の発生領域に対応した応答評価器を複数設計し、発生領域に合わせて応答評価器を選択して制御を行うことにより、建物の応答低減に効果があることがわかった。また、地震動の最大速度を階層型ニューラルネットワークの入力情報として用いて設計した応答評価器は、小振幅から大振幅までの異なる振幅レベルの地震動に対して効果的に制御を行うことができた。

一方、応答評価器の設計と違う領域の地震動 (学習していない地震動) に対しては、表-4 からも明らかなように制御性能が悪化する場合が多いことがわかった。ただし、応答評価器と地震動の組み合わせによってはそれほど悪化しない場合もある。

§ 5. 結論

本論文では、免震構造物の応答評価に基づく新たなセミアクティブ制御システムを提案した。この中で検討した標準型、発展型の解析結果をまとめ、システムとしての設計を考えると以下ようになる。

- (1) 標準型の応答評価器を標準として、常時待機する。これにより、学習、未学習の地震動に対して制御性

能が確保される。

- (2) 緊急地震速報などにより事前に地震の情報が得られたときは、発展型の考え方にに基づき、地震の発生領域に対応した応答評価器を選択する。これにより、制御性能の向上が期待される。
- (3) 新たに地震が発生した場合は、過去のシミュレーション結果も参照し、領域の統合を行うことが可能であり、柔軟かつ発展的なシステムの構築が可能である。

本検討において、応答評価器による建物応答の低減効果を示したが、多様な地震動に対し、トレードオフの関係にある免震層変位と建物各層の絶対加速度の両方をさらに低減して制御性能の向上をはかるために、以下の課題に取り組む予定である。

- (1) ニューラルネットワークの入力層情報のうち、制御性能を大きく左右する情報を、ある指標に基づいて選別する方法を実現する。これにより、地震動の周期特性や大きさに対して、よりロバストな制御系が構築されることが考えられる。
- (2) 過去の地震記録の分析とこれを用いたシミュレーション結果に加え、今後新たに発生する地震の記録分析やシミュレーションの結果を基に、応答評価を行う地域の分割・統合方法の体系化を行う。また、地震動データベースの充実をはかり、常にアップデートできる発展的なシステムの構築を行う。

謝辞

本論文の内容の一部は、故吉田和夫教授 (慶應義塾大学) にご指導をいただきましたことを記し、感謝申し上げます。

<参考文献>

- 1)吉田和夫, 姜馨国, 金泰林: “多自由度系の振動絶縁のLQG制御と H^∞ 制御”, 日本機械学会論文集(C編), Vol.61, No.583, pp.975-980, 1995.
- 2)福喜多輝, 吉田和夫: “地震入力を受ける非線形構造物の非定常アクティブ制御に関する研究”, 日本機械学会論文集(C編), Vol.74, No.740, pp.833-842, 2008.
- 3)吉田和夫: “世界初のセミアクティブ免震ビル”, 日本機械学会誌, Vol.104, No.995, pp.698-702, 2001.
- 4)篠崎洋三, 藤山淳司, 長島一郎, 欄木龍大, 北川良和, 吉田和夫, 他: “可変構造セミアクティブ免震システムの開発と適用(その1)～(その6)”, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, 構造II, pp.723-734, 2005.
- 5)吉田和夫, 藤尾忠洋: “双線形最適制御理論とセミアクティブ免震制御への応用”, 日本機械学会論文集(C編), Vol.67, No.656, pp.992-998, 2001.
- 6)長島一郎, 欄木龍大, 日比野浩, 高木政美: “可変減衰ダンパーを用いた免震システムの変形抑制制御”, 日本建築学会構造系論文集, No.577, pp.37-45, 2004.
- 7)井上波彦, 渡壁守正, 西村秀和, 龍神弘明, 仲宗根淳, 中村佳也: “2自由度系免震建物に適用したMRダンパによるセミアクティブ制御(GS制御)性能”, 日本建築学会構造系論文集, No.609, pp.57-64, 2006.
- 8)佐藤栄児, 藤田隆史: “ビゾアクチュエータを用いた可変摩擦ダンパによる建築構造物のセミアクティブ免震”, 日本機械学会論文集(C編), Vol.71, No.702, pp.405-412, 2005.
- 9)佐藤栄児, 藤田隆史: “超磁わいアクチュエータ駆動の油圧システムを用いた可変摩擦ダンパによる建築構造物のセミアクティブ免震”, 日本機械学会論文集(C編), Vol.73, No.730, pp.1723-1730, 2007.
- 10)長門英明, 吉田和夫: “ニュートラルネットワークによる動吸振器の制御”, 日本機械学会論文集(C編), Vol.58, No.550, pp.1755-1761, 1992.
- 11)谷明勲, 河村廣: “階層型ニューラルネットワークおよびファジィ理論を用いた建築構造物の最適適応予測制御システム”, 日本建築学会構造系論文集, No.458, pp.179-189, 1994.
- 12)山田登志郎, 鈴木宏一, 小林創: “ファジィ理論による建築構造物の非線形履歴応答制御 ファジィ理論の建築構造物の地震応答制御への適用性に関する研究(I)”, 日本建築学会構造系論文集, No.466, pp.59-68, 1994.
- 13)山田登志郎, 石田雅利, 澤本佳和: “建築構造物のファジィ非線形履歴応答制御における制御パラメータの適正值について ファジィ理論の建築構造物の地震応答制御への適用性に関する研究(II)”, 日本建築学会構造系論文集, No.473, pp.95-105, 1995.
- 14)気象庁: “平成19年(2007年)新潟県中越沖地震における緊急地震速報の利用状況について”, available from <http://www.jma.go.jp/jma/press/0708/02b/070802chuetsuoki_riyou.pdf>, (accessed 2009-7-31), 2007.
- 15)源栄正人, 眞鍋俊平: “学校における緊急地震速報利活用の普及・展開に関するアンケート調査”, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, 構造II, pp.663-664, 2007.
- 16)吉岡献太郎: “半導体工場における緊急地震速報利活用の検討”, 日本地震工学会誌, No.7, pp.12-15, 2008.
- 17)那須正, 宮村正光, 高橋元一, 神田克久, 山谷博愛: “緊急地震速報を利用した早期地震警報の建設現場への適用(1), (2)”, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, 構造II, pp.127-130, 2006.
- 18)神田克久: “ニューラルネットワークによる自己学習機能を持った地震早期検知システムの研究”, 日本建築学会構造系論文集, No.498, pp.59-66, 1997.
- 19)吉田和夫, 高橋正樹: “観測器の応答と誤差の評価に基づく知的安全制御系設計”, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2007 CD-ROM 論文集, Paper No.838, 2007.
- 20)福喜多輝, 高橋正樹, 吉田和夫: “システムの応答評価に基づく減衰係数切り替え型ダンパを用いたセミアクティブ免震”, 日本機械学会論文集(C編), Vol.75, No.752, pp.865-873, 2009.
- 21)福喜多輝, 高橋正樹: “地震の震源域と揺れの大きさを考慮したシステムの応答評価に基づくセミアクティブ免震”, 日本機械学会論文集(C編), Vol.75, No.759, pp.2917-2925, 2009.
- 22)横田治彦, 柴慶治, 岡田敬一, 田中貞二: “東京都心部の泥岩層中で観測される地震動の特性について(その1. 震源別のスペクトル特性について)”, 日本建築学会学術講演梗概集, B, 構造I, pp.393-394, 1986.
- 23)那須信治, 竹内盛雄, 森岡敬樹, 山田真: “東京地方における地震動の諸性質(その2)”, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.511-512, 1981.

