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*

福喜多 輝^{*1}, 高橋 正樹^{*2}, 吉田 和夫^{*3}

Semi-Active Control for Isolated Structure Using Variable Damping Device Based on Response Evaluator of System

Akira FUKUKITA^{*4}, Masaki TAKAHASHI and Kazuo YOSHIDA

^{*4} Institute of Technology, Shimizu Corporation,
3-4-17 Etchujima, Koto-ku, Tokyo, 135-8530 Japan

This paper presents a response evaluator which evaluates the response of the system and decides the control input to the system. It is applied to a base isolated structure with a semi-active oil damper whose damping coefficient has large or small values. Absolute acceleration of a top story and displacement of an isolated layer are the input signals of the response evaluator, and switching parameter for the damping coefficient is the output signal of the response evaluator. The response evaluator consists of a layered neural network, and a genetic algorithm is used to adjust the neural network parameters which decide the performance of the response evaluator. 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 evaluator is verified.

Key Words: Semi-Active Control, Seismic Isolation, Variable Damper, Neural Network, Genetic Algorithm, Response Evaluation

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、より現実的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、ダンパの減衰力を可変にしたものが多い。吉田ら⁽⁵⁾は、免震層の変形と上部構造の絶対加速度の低減をめざし、Maxwell モデルでモデル化した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ことによ

り、スカイフック制御や通常のパッシブ免震（天然ゴムとオイルダンパの組み合わせ、鉛プラグ入り積層ゴム）に比べて特に 1Hz 以上の高振動数領域において振動伝達率を低減できること、小レベルの地震動から免震効果を発揮できることを示した。長島ら⁽⁶⁾は、大きな地震入力の際に免震層の変形抑止を目的として、オイルダンパに設定した基準振幅値と一定時間後の予測振幅値を時々刻々比較してオイルダンパの減衰係数を変化させることにより、過大な変形を抑止できること、ダンパ変位の基準振幅値を調整することにより応答加速度と応答変位のトレードオフを考慮した性能調整ができることを実験的に示した。井上ら⁽⁷⁾は MR ダンパを用いた免震構造物を対象として、MR ダンパの減衰係数を可変とした線形パラメータ変動系に対して、動作状況に応じて制御器をスケジューリングするゲインスケジュールド制御を適用し、シミュレーションおよび振動台実験から幅広い周波数帯域で応答加速度、変位ともに低減できることを示した。他にも、 piezoelectric 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もある⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

また、セミアクティブ制震に関する研究では、ブレースを on または off にすることにより建物の剛性を変化

* 原稿受付 2008 年 8 月 20 日。

^{*1} 正員、清水建設(株)技術研究所(〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)。

^{*2} 正員、慶應義塾大学理工学部(〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)。

^{*3} 正員、フェロー、慶應義塾大学理工学部。

E-mail: fukukita@shimz.co.jp

させる可変剛性システム⁽¹⁰⁾、建物各層に減衰を可変にするオイルダンパを設置し、エネルギー吸収能力を最大限に活用した構造制御システム⁽¹¹⁾などがあり、実際の建物に適用され、風や地震などに対して応答低減効果を発揮している。

一方、建築構造物の振動制御にニューラルネットワークやファジィ理論を使用した研究も行われている。長門⁽¹²⁾は、アクティブ動吸振器による制振問題について、ニューラルネットワークの特徴を利用して運動方程式を導かずにアクティブ動吸振器に対する最適制御則を導出し、さらに非二次形式の評価関数による非線形制御の実現をしている。谷⁽¹³⁾は、階層型ニューラルネットワークを用いて入力地震動の予測と構造同定を行い、ファジィ理論を適用して最適適応予測制御システムの構築を行っている。また、山田・他⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾は、建物各層がバイリニア型の復元力特性を持つ非線形履歴系の建物モデルに対し、大地震を受けた際に建物頂部に設置されたアクティブマストライバの発生する制御力を、各層の非線形履歴特性を考慮しながらファジィ理論に基づいて決定し、解析と実験から非線形領域の履歴応答制御が可能であることを示している。

吉田⁽¹⁶⁾は、想定される状況に対してはもちろんのこと、想定されていない状況に対しても高度なシステムの安全性を確保することを目的とした知的制御手法を提案している。この考え方は、従来のモデルベースの制御では使用していなかった、観測器からの状態推定値と制御対象システムからの出力の誤差を誤差評価器を導入して積極的に評価するものである。また、モデルベースの制御でない場合は、目標値との比較も含めシステムの応答を積極的に評価する応答評価器を導入している。

本研究では、このような吉田らの考え方にに基づき、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提案する。本制御系では、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切り替えを行うことで、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。

Fig. 1 Typical conventional control system

Fig. 2 Control system with error evaluator

Fig. 3 Control system with response evaluator

2. システムの応答評価に基づく制御系の構成

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る。この誤差は、初期誤差や外乱の侵入によるものと考えられ、設計時からのモデル変動や異常の診断には用いられていなかった。また、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⁽¹⁶⁾は、図2に示すような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3に示すような応答評価器を提案している。この応答評価器は、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特性を変化させるものである。

本研究では、応答評価器の有効性を検証するため、減衰係数を可変にできるオイルダンパを有するセミアクティブ免震構造物を制御対象システムとして、応答

評価器を適用した場合の応答低減効果について検討した。具体的には、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。応答評価器の性能は、ニューラルネットワークの結合重みなどのパラメータにより決定されるが、本研究では、その調整において明確な教師を与えることは困難であるため、制御目的を表現した評価関数を用いた遺伝的アルゴリズムにより、パラメータを決定する。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。

また、ここでは、なるべく少ないシステムの応答情報を使って応答評価器を設計するという考えに基づき、免震層変位と建物最上階の絶対加速度の応答だけを応答評価器の入力とし、出力であるオイルダンパの減衰係数を決定した。対象とする地震動は、最大速度 50cm/s に基準化したレベル 2 またはそれ以上の大きさとし、減衰係数は大きい値（以後、Hard）、小さい値（以後、Soft）を選択できるものとした。本制御により、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す。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最上階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。

3. 免震構造物のモデル化

3-1 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⁽⁵⁾を解析対象とした。図 4 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 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。

3-2 オイルダンパのモデル化 次に、オイルダンパの減衰特性⁽⁵⁾を図 5 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、図 6 に示すようにばねとダッシュポットを直列に接続

Fig. 4 Structural model with oil dampers

Table 1 Specification of the structural model

Layer	Mass ($\times 10^3$ kg)	Spring Constant ($\times 10^6$ N/m)	Coefficient of Viscous Damping ($\times 10^6$ 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

Fig. 5 Characteristics of variable oil dampers

Fig. 6 Maxwell model for oil damper

Fig. 7 Time delay model for oil damper

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 $k_s = 29.4 \times 10^6$ 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 $T = 30$ msec とした。図 7 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震層に 6 台設置するものとした。

3.3 運動方程式および状態方程式 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 4 の免震構造物モデルの運動方程式は次式のように表される。

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

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

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

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

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、ばね定数を表している。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、次式のようになる。

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

$$\dot{\mathbf{x}}_s(t) = \mathbf{A}_s \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{B}_s \{x_1(t) - x_0(t)\} u(t) + \mathbf{D}_s \ddot{x}_g(t) \quad (6)$$

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

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。次章では制御入力、すなわちオイルダンパの減衰係数の切り替え則について述べる。

4. 応答評価器の制御系設計

4.1 階層型ニューラルネットワーク 2 章で提案した応答評価器を導入して制御系設計を行う。本研究では、図 8 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。入力層は免震層の変位と建物最上階の絶対加速度の 2 ユニットの、中間層は 5 ユニットの、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 ユニットの。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、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。

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

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

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

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

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

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

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

ここで、 w は結合重み、 θ はしきい値を表す。

4.2 学習方法 本研究では、入力層が免震層の変位と建物最上階の絶対加速度、出力層がダンパの減衰係数選択のための切り替え信号のため、階層型ニュー

Fig. 8 Multi-layered Neural Network

ラルネットワークの結合重み w 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。

各層間の結合重み w 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。

$$f_{fit}(x) = \sum_{i=1}^3 f_{pi} \frac{1}{(\ddot{x}_{10} + \ddot{x}_g)_{imax}} \quad (15)$$

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。

$$c_s(t) = (1 - p(t))c_{smax} + p(t)c_{smin} \quad (17)$$

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

ここで、 c_{smax}, c_{smin} 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。

5. シミュレーション

3 章に示したオイルダンパで、減衰係数が Hard または Soft で一定の場合と、階層型ニューラルネットワー

Table 2 List of earthquake motions

No.	Earthquake	Direction	Year	Max. Acc. (cm/s ²)	Teaching data
1	El Centro	NS	1940	511	○
2	Taft	EW	1952	496	○
3	Hachinohe	NS	1968	225	○
4	JMA Kobe	NS	1995	818	
5	BCJ Level2	—	—	356	

クを用いた応答評価器で設計した減衰係数に切り替えた場合について、建物の応答低減効果を比較した。なお、減衰係数を Hard または Soft で一定とする場合については、リリーフ機構がないものとあるものの両方について検討を行った。

まず、リリーフ機構がないとし、学習に使用した表 2 の Taft EW (1952) を入力地震動として用い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を図 9 に示す。また、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 10 に示す。各図中の凡例 RE は応答評価器による切り替えの場合を示す。図 9 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ならないように、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 10 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。表 3 に免震層変位の最大値および rms 値を示すが、最大値および rms 値ともに切り替えにより Soft に比べて低減していることがわかる。

同じく、リリーフ機構がないとし、学習に使用した表 2 の Hachinohe NS (1968) および El Centro NS (1940) を入力地震動として用いた場合の波形、および最大値分布を図 11~図 14 に、免震層変位の最大値および rms 値を表 4, 表 5 に示す。地震動が変わっても、減衰係数

Fig. 9 Waveform of response (Taft EW)

Fig. 11 Waveform of response (Hachinohe NS)

Fig. 10 Maximum value of response (Taft EW)

Fig. 12 Maximum value of response (Hachinohe NS)

Table 3 Maximum and root-mean-square value of displacement of isolation (Taft EW)

Unit: cm	Soft	Hard	RE
disp.(max)	25.96	15.33	24.64
disp.(rms)	11.59	3.97	10.64

の切り替えの様子やそれに伴う応答波形の傾向，最大値分布，応答低減効果について，上述した内容と同様のことが言える。

次に，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波形および最大値分布を図15，図16にそれぞれ示す。また，建築センター

Table 4 Maximum and root-mean-square value of displacement of isolation (Hachinohe NS)

Unit: cm	Soft	Hard	RE
disp.(max)	26.96	17.08	23.98
disp.(rms)	9.77	7.02	8.29

波(レベル2)の場合の最大値分布を図17に示す(いずれもリリーフ機構なしの場合)。未学習の地震動が入力された場合でも，学習した3波の場合と同様に応答評価器によって減衰係数の切り替えが行われ，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

Fig. 13 Waveform of response (El Centro NS)

Fig. 15 Waveform of response (Kobe NS)

Fig. 14 Maximum value of response (El Centro NS)

Fig. 16 Maximum value of response (Kobe NS)

Table 5 Maximum and root-mean-square value of displacement of isolation (El Centro NS)

Unit: cm	Soft	Hard	RE
disp.(max)	23.12	16.44	20.81
disp.(rms)	7.42	4.44	6.88

れ、効果の傾向も同様であることがわかる。なお、建築センター波の場合のSoftの免震層変位は約50cmとなっており、実際の建物の設計には免震層のクリアランスやダンパ量の検討が必要である。

さらに、リリース機構がある場合についても同様の検討を行った。結果の一例としてJMA Kobe NS (1995)

を入力地震動とした場合を図18、図19にそれぞれ示す。応答評価器による制御の場合、切り替え信号 $p(t)$ が0(Hard)の時に減衰係数 $c_s(t)$ は $0.08 \times 10^6 \text{Ns/m}$ となっており、リリース機構が作動していることがわかる。リリース機構がない場合と同様に、減衰係数の切り替えが適切に行われ、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ていることがわかる。

6. 結 言

本研究では、制御対象システムの応答を積極的に制御系設計に用いる応答評価器の提案を行い、その有効性を検証した。制御対象として減衰係数切り替え型の

Fig. 17 Maximum response (BCJ Level2)

オイルダンパを備えたセミアクティブ免震構造物を取り上げ、最上階の絶対加速度と免震層変位の情報から、階層型ニューラルネットワークを用いてオイルダンパの減衰係数を2段階に切り替える応答評価器を設計した。階層型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を用いた。このパラメータ調整に使用した地震動および使用しなかった地震動入力に対し、減衰係数の切り替えが設計通りに行われ、各層の絶対加速度、相対変位および層間変形角は、減衰係数がHardまたはSoftで一定の場合の中間値をとり、応答低減効果があることが検証された。この応答評価器の導入により、少ない入力情報（最上階絶対加速度と免震層変位）かつ少ない操作量（オイルダンパの減衰係数の2段階切り替え）にも関わらず、未学習の地震動入力に対しても設計で想定した制御性能が発揮され、有効な制御系設計手法であることがわかった。

今後は、応答評価器への入力情報の選定自動化、既知の情報（例えば地震動の特性など）の利用、階層型ニューラルネットワークの出力層数の調整による制御系設計における拡張性、などについての検討を行い、制御性能の向上や制御系設計の発展を図っていきたいと考えている。

文 献

- (1) Yoshida, K., Kang, S. and Kim, T., LQG Control and H^∞ Control of Vibration Isolation for Multi-Degrees-of-Freedom Systems, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.61, No.583 (1995), pp.975-980 (in Japanese).
- (2) Fukukita, A. and Yoshida, K., Non-Stationary Active Control for Non-Linear Structure Subjected to Seismic Wave, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.74, No.740 (2008), pp.833-842 (in Japanese).

Fig. 18 Waveform of response with relief (Kobe NS)

Fig. 19 Maximum value of response with relief (Kobe NS)

- (3) Yoshida, K., First Building with Semi-Active Base Isolation, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.104, No.995 (2001), pp.698-702 (in Japanese).
- (4) Shinozaki, Y., Toyama, J., Nagashima, I., Maseki, R., Kitagawa, Y. and Yoshida, K., Development and Application of Semi-active Base-Isolation System (Part 1)~ (Part 6), *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, B-2, Structures II, Structural Dynamics, Nuclear Power Plants* (2005), pp.723-734 (in Japanese).
- (5) Yoshida, K. and Fujio, T., Bilinear Optimal Control Theory and its Application to Semi-Active Vibration Isolation Control, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.67, No.656 (2001), pp.992-998 (in Japanese).

- (6) Nagashima, I., Maseki, R., Hibino, H. and Takaki, M., Displacement Control Method of Base-Isolation System Using Variable Damping Device, *Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan*, No.577 (2004), pp. 37-45 (in Japanese).
- (7) Inoue, N., Watakabe, M., Nishimura, H., Ryujin, H., Nakasone, J. and Nakamura, Y., Response Control Performance of Semi-Active Isolation System Using the GS Control for a Two-Degree-of-Freedom Structure with Magneto-Rheological Fluid Damper, *Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan*, No.609 (2006), pp. 57-64 (in Japanese).
- (8) Sato, E. and Fujita, T., Semi-Active Seismic Isolation System with Controllable Friction Dampers Using Piezoelectric Actuators, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.71, No.702 (2005), pp. 405-412 (in Japanese).
- (9) Sato, E. and Fujita, T., Semi-Active Seismic Isolation System with Controllable Friction Dampers Using Hydraulic System Driven by Giant Magnetostrictive Actuators, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.73, No.730 (2007), pp. 1723-1730 (in Japanese).
- (10) Koberi, T., Takahashi, M., Nasu, T. and Niwa, N., Seismic Response Controlled Structure with Active Variable Stiffness System, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22(9), 1993, pp.925-941.
- (11) Kurino, H., A Study on Decentralized Structural Control Algorithm for On/Off Type Semi-Active Dampers, *Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan*, No.571 (2003), pp. 79-86 (in Japanese).
- (12) Nagato, H. and Yoshida, K., Control of Active Dynamic Vibration Absorber by Neural Network, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.58, No.550 (1992), pp. 1755-1761 (in Japanese).
- (13) Tani, A. and Kawamura, H., Optimal Adaptive and Predictive Control System of Buildings by Multi-layered Neural Network and Fuzzy Theory, *Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan*, No.458 (1994), pp. 179-189 (in Japanese).
- (14) Yamada, T., Suzuki, K. and Kobayashi, H., Nonlinear Hysteretic Response Control of Building Structures by Using Fuzzy Set Theory : A Study on Applicability of Fuzzy Set Theory to Seismic Response Control of Building Structures (I), *Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan*, No.466 (1994), pp. 59-68 (in Japanese).
- (15) Yamada, T., Ishida, M. and Sawamoto, Y., Practical Values of Control Parameters on Fuzzy Nonlinear Hysteretic Response Control of Building Structures : A Study on Applicability of Fuzzy Set Theory to Seismic Response Control of Building Structures (II), *Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan*, No.473 (1995), pp. 95-105 (in Japanese).
- (16) Yoshida, K. and Takahashi, M., Design of Intelligent Safe Control System Based on Evaluation of Response and Error in Observer, *Proceedings of the Dynamics and Design Conference 2007*, 838, (CD-ROM) (in Japanese).