地震の特性とセンサ配置を考慮した免震建物のセミアクティブ制御系設計 ーセンサ入力と制御出力の制御性能に与える影響ー

福喜多 輝^{*1}, 高橋 正樹^{*2}

Semi-active Control Design for Base Isolated Building Considered to the Characteristics of Earthquake and Location of Sensors - Control Effect of Sensor Input Data and Control Output Signals -

Akira FUKUKITA ^{*1} and Masaki TAKAHASHI

^{*1} Shimizu Corporation, Institute of Technology
Etchujima 3-4-17, Koto-ku, Tokyo, 135-8530 Japan

This paper presents the method of semi-active control design considered with characteristic of earthquake motion and sensors placement for 4-story base isolated structure with 4 oil dampers whose damping coefficient can be changed at two steps. This method uses information of both sensor placement and structural response in the control design at the same time. The relationship between the sensor placement and control effect come out in this paper. The genetic algorithm is applied to multi-layered neural network and this algorithm is used to adjust the neural network parameters in learning. We can realize reduction of the structural response to use more sensors and the relationship between the sensor placement and control effect under three different earthquake motions by the proposed control design method.

Key Words : Semi-Active Control, Sensor Placement, Base Isolation, Genetic Algorithm

1. はじめに

免震建物は、積層ゴムと減衰部材からなる免震装置を建物基礎部に設置した建物で、免震装置によって地震による揺れを建物に伝わりにくくし、建物の応答を低減している。この免震装置によって建物の柱や梁といった構造躯体の安全性が確保されるのはもちろんのこと、建物内の天井の落下、家具・什器の転倒・移動、設備の損傷などを防ぐことにも効果的であり、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震でも免震建物の効果が実証された⁽¹⁾⁽²⁾。現在、免震装置の多くは減衰性能が一定であるパッシブタイプであり、異なる周期特性や振幅の地震動に対して免震性能を最大限発揮できるように性能を高めたセミアクティブタイプの免震装置も開発されているが、実建物に適用した例は少ない⁽³⁾⁽⁴⁾。また、長周期地震動や東北地方太平洋沖地震のような継続時間の長い地震動に対しては、減衰部材の発熱による性能低下が懸念されるが、これを考慮した制御系設計についての研究が行われている⁽⁵⁾。

一方、建物においてセンサ設置位置までを考慮して制御系設計に組み込む考え方はなかった。通常、建物の振動特性を把握する際には、各次数のモードの腹に相当する位置にセンサを配置することが多い。特に、センサ台数に制約があるときは、多くのモード情報が含まれている建物頂部に優先的にセンサを設置し、そこで得られた時刻歴データから時間領域や周波数領域で同定を行い、建物の固有周期や減衰を把握する。地震や風による建物振動をアクティブあるいはセミアクティブに制御する場合は、建物の応答情報が必要である。センサ設置位置は

^{*} 原稿受付 2012年7月17日

^{*1} 正員, 清水建設 (〒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

E-mail: fukukita@shimz.co.jp

制御性能にも影響があるが、その決定方法には常套手段のような決められたルールは存在しない。風による建物の応答は1次モードが支配的になることが多いが、地震による建物の応答は、地震波の周期特性によって振動性状が大きく変化し、1次モードに相当する応答分布に必ずしもならないことが多い。建物の振動測定と同様に振動モードの腹の位置にセンサを設置しようとする、地震波の種類ごとに多数の組み合わせが存在し、センサ配置を決めることは非常に難しくなる。従来の線形制御理論では、建物を線形モデルと仮定し、建物全層の状態量がオブザーバで推定できる場合も含めて既知であることが前提であった。建物全層へのセンサ配置は実際には困難なため、オブザーバで推定することになるが、その際には可観測性を満たすようにセンサを配置しており、これがセンサ配置の決定根拠となっていた。

過去の研究においては、線形制御理論の枠組みを維持したまま非線形モデルへ対応できる制御理論として双線形制御理論⁽³⁾があった。著者らはこれとは異なり、全状態量が観測できるとしてニューラルネットワークにより非線形切替制御を実現している⁽⁶⁾。しかし、実際には全状態量を観測することは困難で限られた台数のセンサを制御性能を維持したまま適切な位置に設置することが必要となる。建物を設計する際に想定する多数の地震波に対して、より効果的に建物応答低減を行うためには、なんらかの指標、ルールに基づいてセンサ配置を決定し、センサ配置に合理性を持たせることが必要である。すなわち、なるべく多くの周期特性が異なる地震波に対して制御効果を発揮できるような制御系設計とセンサ配置が必要である。

本論文では、4層の免震建物モデルを対象として、周期特性の異なる地震波に対して、センサの配置と制御出力の違いによる応答低減効果の関係性について検討する。まず、免震層の変位と最上層の加速度を測定するセンサを用いて、異なる3つの地震波に対して共通の1つの制御系をニューラルネットワークにより設計し、その制御系で建物の応答低減を実現できることを示す。次に、免震層の加速度をセンサとして追加した場合に、応答低減効果が増加することを示す。最後に、さらに最上層の変位をセンサとして追加した場合には、より一層の応答低減効果が増加することを示す。また、提案する制御系は、制御系設計で使用しなかった地震波に対しても応答低減を実現できるロバスト性があることを示す。

具体的には、免震層には減衰係数を2段階に切り替え可能なオイルダンパを4台設置し、上記3ケースの制御系を適用して減衰係数を切り替える。4台のダンパは個別に減衰係数を切り替えることとする。制御目標は、減衰係数を上限値(Hard)、下限値(Soft)で一定にした場合に比べて、切り替えた場合には、免震層変位と最上層加速度がHardとSoftの時の中間値となることを基準とし、さらに、免震層変位がHardの場合より、または最上層加速度がSoftの場合よりも低減できるケースがあることを示す。

2. 地震動と免震構造物

2.1 地震動

本論文で用いた地震動は、海溝型の大規模地震として評価されている関東地震(佐藤波、以下、関東波と呼ぶ)⁽⁷⁾、東海・東南海地震(中部波、以下、東海・東南海波と呼ぶ)⁽⁸⁾、および南海地震(釜江波、以下、南海波と呼ぶ)⁽⁹⁾である。加速度の時刻歴波形と減衰5%の速度応答スペクトルを図1、図2にそれぞれ示す。

2.2 免震構造物のモデル化

解析対象は、図3に示す、最下層に天然ゴム系積層ゴムと減衰係数を2段階に切り替え可能なオイルダンパを設置した、4階建ての免震構造物である。免震層は上部建物を1質点系とみなしたときのオイルダンパなしの状態で固有周期を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。

Fig.1 Waveform of acceleration

Fig.2 Velocity response spectrum ($h=5\%$)

ここで使用したオイルダンパは、図4に示すように、弁の開度を調整して減衰係数を上限 (Hard)、下限 (Soft) の2段階に切り替えることが可能であり、減衰力が約640kNでリリースする機構を備えている。モデル化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⁽³⁾。オイルダンパの諸元を表1に示す。また、減衰係数を切り替える際に生じる時間遅れは、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⁽³⁾。以上の特性を持つオイルダンパを免震層に4台設置するものとした。

Table 1 Specification of 4-degree-of-freedom structural model

Layer	Mass ($\times 10^3$ kg)	Spring constant ($\times 10^8$ N/m)	Coefficient of viscous damping ($\times 10^6$ Ns/m)
4	1000	1.2317	0.7841
3	1000	1.8475	1.1761
2	1000	2.4633	1.5681
1	1000	0.1755	0.3351
Oil damper	—	0.2940	14.7 (max)
			0.8 (min)

Fig.3 4-degree-of-freedom model

Fig.4 Characteristics of variable oil damper

2・3 運動方程式と状態方程式

図3に示す免震構造物の運動方程式は次式となる。

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

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

$$m_i(\ddot{x}_i(t) + \ddot{x}_g(t)) + (c_i + c_{i+1})\dot{x}_i(t) + (k_i + k_{i+1})x_i(t) - c_{i+1}\dot{x}_{i+1}(t) - k_i x_{i-1}(t) - k_{i+1} x_{i+1}(t) = 0 \quad (i = 2, 3) \quad (4)$$

$$m_4(\ddot{x}_4(t) + \ddot{x}_g(t)) + c_4\dot{x}_4(t) + k_4 x_4(t) - c_4\dot{x}_3(t) - k_4 x_3(t) = 0 \quad (5)$$

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、 $c_s(t)$ 、 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、次式のようなになる。

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

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

$$\mathbf{x}_s(t) = [x_0(t) \quad x_1(t) \quad \cdots \quad x_4(t) \quad \dot{x}_1(t) \quad \cdots \quad \dot{x}_4(t)]^T$$

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、双線形システムになる。

3. 制御系設計

3・1 階層型ニューラルネットワーク

本論文では、センサの配置と制御出力の違いによる応答低減効果の関係性について検討する。応答低減の対象は、建物最上層の絶対加速度、および免震層の変位である。センサ配置は以下の(a)～(c)の3通りを比較した。(a)免震層の変位と最上層の加速度(controller A)、(b)controller A に免震層の加速度を追加した場合(controller B)、(c)controller B に最上層の変位を追加した場合(controller C)の3通りである。なお、学習対象とした地震波は2章に示した、関東波、東海・東南海波、南海波の3種類とし、すべての地震波に共通の1つの制御系をニューラルネットワークにより構築してロバストな制御系設計をめざした。制御出力すなわちオイルダンパへの制御信号は、同一性能の4台のオイルダンパを個別に切り替えることとした。ニューラルネットワークの構成を図5に示す。このニューラルネットワークを用いて、式(7)のオイルダンパの減衰係数 $c_s(t)$ を決定する。入力層の数は(a)が2ユニット、(b)が3ユニット、(c)が4ユニット、出力層は4ユニット、中間層は8ユニットとした。各層の計算方法を以下に示す。

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

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

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

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

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

$$\text{伝達関数 (入力層} \rightarrow \text{中間層)} : f_h(x) = \frac{2}{1 + \exp(-2x)} - 1 \quad (13)$$

$$\text{伝達関数 (中間層} \rightarrow \text{出力層)} : f_o(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 0) \\ 0 & (x < 0) \end{cases} \quad (14)$$

ここで、 w は結合重み、 θ はしきい値を表す。入力層に与える情報の範囲はネットワークの汎化能力にも影響するため、入力層に与える情報を正規化するパラメータについても学習的に調整することとした。

Fig.5 Multi-layered neural network

3・2 学習手順

地震に対する応答を扱う場合、制御によってあらかじめどのような応答になるのか不明なため、階層型ニューラルネットワークの結合重み w のパラメータ調整を行う際、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 を以下の手順で決定する。

各層間の結合重み w および入力層に与える情報を正規化するためのパラメータをコード化した染色体を1個体として、20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。以下の評価関数では最上層の加速度と免震層の変位に関する評価とペナルティ関数から構成され、学習に用いる3つの地震波に対する適応度の和をその個体の適応度とする。

$$f = \sum_{j=1}^3 p_{a_j} p_{x_j} (f_{a_j} + f_{x_j}) \quad (15)$$

$$f_{a_j} = \exp\left(-\frac{a^{\max_j} - a_{\min_j}}{a_{\min_j}}\right), \quad f_{x_j} = \exp\left(-\frac{x^{\max_j} - x_{\min_j}}{x_{\min_j}}\right)$$

ここで、式(15)の j は、2章で示した3つの地震波を表す。 $a^{\max_j}$ 、 $x^{\max_j}$ は各層の絶対加速度、地面からの相対変位の最大値であり、次式のように表せる。

$$a^{\max_j} = \max\left(\max|\ddot{x}_i(t) + \ddot{x}_g(t)|\right), \quad i = 1 \sim 4 \quad (16)$$

$$x^{\max_j} = \max\left(\max|x_i(t)|\right), \quad i = 1 \sim 4$$

また、 $a_{\max_j}$ 、 $a_{\min_j}$ 、 $x_{\max_j}$ 、 $x_{\min_j}$ は減衰係数が Hard または Soft で一定としたときの絶対加速度の最大値 (Hard の時が $a_{\max_j}$ 、Soft の時が $a_{\min_j}$)、相対変位の最大値 (Hard の時が $x_{\min_j}$ 、Soft の時が $x_{\max_j}$) をそれぞれ表す。

式(15)中の f_{a_j} 、 f_{x_j} はそれぞれ絶対加速度、地面からの相対変位の評価関数で、絶対加速度、相対変位が大きくなるほど f_{a_j} 、 f_{x_j} は小さくなる。 p_{a_j} 、 p_{x_j} はそれぞれ絶対加速度、地面からの相対変位に関するペナルティ関数であり、制御をしない (減衰係数が Soft または Hard で一定値) 場合の絶対加速度、相対変位の応答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。

・絶対加速度のペナルティ関数

$$p_{a_j} = \begin{cases} 1.0 & (a^{\max_j} < a_{\min_j}) \\ 0.6 & (a^{\max_j} \leq a_{\max_j} \text{ and } a^{\max_j} > a_{\min_j}) \\ 0.1 & (a^{\max_j} > a_{\max_j}) \end{cases} \quad (17)$$

・相対変位のペナルティ関数

$$p_{x_j} = \begin{cases} 1.0 & (x^{\max_j} < x_{\min_j}) \\ 0.6 & (x^{\max_j} \leq x_{\max_j} \text{ and } x^{\max_j} > x_{\min_j}) \\ 0.1 & (x^{\max_j} > x_{\max_j}) \end{cases} \quad (18)$$

式(17)、式(18)より、減衰係数が Soft (下限値)、Hard (上限値) で一定の場合の建物応答値をペナルティ関数の判定条件として利用していることがわかる。

以上の式を用いて、20 個体に対しての適応度の計算を行い、エリート保存戦略により 2 個体、ルーレット戦略により 4 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でそれぞれ 4 個体生成する。以上を合わせると次世代の 16 個体が生成され、さらにランダムに 4 個体を生成する。この手順を一代として繰り返しを行い、より適応度が高い個体を探索した。

階層型ニューラルネットワークによる出力を $p(t)$ 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。

$$c_s(t) = (1 - p(t))c_{s\max} + p(t)c_{s\min} \quad (19)$$

$$p(t) = 0 \text{ or } 1 \quad (20)$$

ここで、 $c_{s\max}$ 、 $c_{s\min}$ はオイルダンパの Hard または Soft の減衰係数である。すなわち、式(19)、式(20)によってダンパの減衰係数として Hard または Soft のどちらかが選択されることになる。

以上の学習を、関東波、東海・東南海波、南海波に対して行い、制御系設計を行った。その際の GA の終了条件は共通とし、200 世代とした。

4. シミュレーション

controller A の階層型ニューラルネットワークを用いて、関東波、東海・東南海波、南海波の 3 波に対してシミュレーションを行った。評価対象は、最上層の加速度と免震層変位とし、それぞれの最大値を地震波ごとに図 6 に示す。同様に、controller B、controller C の最大値を図 7、図 8 に示す。なお、図 6～図 8 には、制御系のロバスト性を検証するため、未学習波が入力された場合の最大値もプロットしている。学習波、未学習波の番号との対応は表 2 に示す通りである。

図 6 より、controller A の東海・東南海波の場合は、免震層変位が Hard と Soft の中間で、かつ最上層の加速度が Soft よりも低減していることがわかる。その他の学習波（関東波、南海波）の場合は、免震層変位、最上層加速度ともに Hard と Soft の中間値に収まっており、目標性能を満たしている。次に、controller A の入力層に免震層の加速度を加えた controller B では、東海・東南海波に加えて、南海波でも最上層加速度が Soft よりも低減しており、制御性能が向上していることがわかる（図 7）。さらに、controller B の入力層に最上層の変位を加えた controller C では、学習に使用した 3 波すべてにおいて、免震層変位が Hard よりも低減しており、制御性能が controller A、controller B に比べて向上していることがわかる（図 8）。表 2 には制御性能を表す式(17)、式(18)のペナルティ関数の和を、各制御系（controller A～controller C）と地震波の組み合わせに対して示している。 $p_x + p_a = 0.6 + 0.6 = 1.2$ の時が免震層変位と最上層加速度はともに Hard と Soft の中間値の場合、 $p_x + p_a = 1.0 + 0.6 = 1.6$ または $p_x + p_a = 0.6 + 1.0 = 1.6$ の時が免震層変位または最上層加速度のどちらかが Hard または Soft よりも低減し、もう一方が Hard と Soft の中間値の場合を示す。表 2 と図 6～図 8 の考察から、入力層の情報が増加することにより、制御性能が向上する傾向になることがわかった。

また、制御系のロバスト性については、未学習波に対する最大値で考察する。図 6～図 8 と表 2 より、controller A では、JMA Kobe 波、El Centro 波で免震層変位が Hard よりも低減していること、controller C では、El Centro 波で免震層変位が Hard よりも低減していることがわかる。また、その他の地震波に対しては、controller A～controller C のすべてにおいて、免震層変位と最上層加速度はともに Hard と Soft の中間値に収まっていることから、未学習波に対しても制御目標を達成しており、ロバスト性が確保されていることがわかる。

(a) Acceleration of 4F

(b) Displacement of isolation

Fig.6 Maximum value of structural response in controller A

(a) Acceleration of 4F

(b) Displacement of isolation

Fig.7 Maximum value of structural response in controller B

(a) Acceleration of 4F

(b) Displacement of isolation

Fig.8 Maximum value of structural response in controller C

5. 結 言

本論文では、4層の免震建物モデルに対して、免震層に設置した減衰係数を2段階に切り替え可能なオイルダンパの切り替え則に、遺伝的アルゴリズムを用いたニューラルネットワークによる制御系設計の考え方を適用して、入力層（センサ）の数と制御出力（オイルダンパの減衰係数）が応答低減効果に及ぼす影響を検討した。制御目標は、減衰係数を上限値（Hard）、下限値（Soft）で一定にした場合に比べて、切り替え制御を行った場合に

は、免震層変位と建物加速度が Hard と Soft の時の中間値となることとし、さらなる制御性能の向上をはかった。特性が異なる 3 つの地震波に対して共通の 1 つのニューラルネットワークを設計し、これを用いて制御効果を確認した結果、入力層の数が増加することで、制御性能の向上が図れること、設計した制御系は、未学習波に対しても制御性能を維持できることがわかった。

Table 2 List of earthquake motions and the results of simulation

No.	Earthquake	controller	penalty function			Teaching data
			acc. (4F), pa	disp. (iso.), px	sum, pa+px	
1	Kanto	controller A	0.6	0.6	1.2	Yes
		controller B	0.6	0.6	1.2	
		controller C	0.6	1.0	1.6	
2	Tokai-Tonankai	controller A	1.0	0.6	1.6	Yes
		controller B	1.0	0.6	1.6	
		controller C	0.6	1.0	1.6	
3	Nankai	controller A	0.6	0.6	1.2	Yes
		controller B	1.0	0.6	1.6	
		controller C	0.6	1.0	1.6	
4	BCJ Level 2	controller A	0.6	0.6	1.2	No
		controller B	0.6	0.6	1.2	
		controller C	0.6	0.6	1.2	
5	JMA Kobe	controller A	0.6	1.0	1.6	No
		controller B	0.6	0.6	1.2	
		controller C	0.6	0.6	1.2	
6	El Centro	controller A	0.6	1.0	1.6	No
		controller B	0.6	0.6	1.2	
		controller C	0.6	1.0	1.6	

文 献

- (1) 清水建設ホームページ，“東北地方太平洋沖地震関連技術レポート—免震建物の効果—” (<http://www.shimz.co.jp/theme/earthquake/effect.html>) .
- (2) 猿田正明, 岡田敬一, 中村豊, 長谷部雅伸, “2011 年東北地方太平洋沖地震における免震建物の応答”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (2011), B-2, 構造 II (2011), pp.629-630.
- (3) 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 (2001), pp.992-998.
- (4) 篠崎洋三, 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 1~6)”, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, 構造 II (2005), pp.723-734.
- (5) 福喜多輝, 高橋正樹, “長周期地震動を受ける免震構造物の応答評価に基づくセミアクティブ制御”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.77, No.777 (2011), pp.1649-1660.
- (6) 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 (2009), pp.865-873.
- (7) 佐藤俊明, 壇一男, “関東地震による首都圏の広帯域強震動予測”, 免震構造設計指針, 日本建築学会 (2001), pp.263-274.
- (8) 国土交通省中部地方整備局ほかコンソーシウム, “名古屋市三の丸地区における地域特性を考慮した耐震改修のための基盤地震動の作成 (概要版)” (2004), p.48.
- (9) Kamae, K., Kawabe, H. and Irikura, K, “Strong Ground Motion Prediction for Huge Subduction Earthquakes Using a Characterized Source Model and Several Simulation Techniques”, 13th World Conference on Earthquake Engineering (2004), Paper No.655.