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*

福喜多 輝^{*1}, 高橋 正樹^{*2}

Semi-Active Control for Base Isolated Structure Using Response Evaluator Subjected to Long-Period Earthquake Ground Motion

Akira FUKUKITA^{*1} and Masaki TAKAHASHI

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

This paper presents a response evaluator as a semi-active control method for base isolated building in long-period earthquake response analysis. The absolute acceleration of each story and relative displacement of an isolated layer are the input signals and switching parameter for the damping coefficient is the output signal of the response evaluator. The response evaluator is designed by a multilayered neural network, and a genetic algorithm is used to adjust the neural network parameters which decide the performance of the response evaluator. Four oil dampers are installed at the isolated layer and each damping coefficient of the dampers is set to different value to correspond to various characteristics of earthquake motions, then the total damping force of the isolated layer is multi-step values regardless of using the oil dampers with two-step damping coefficient. By the numerical simulation with the proposed semi-active control method, both the acceleration of each story and the displacement of isolated layer which are trade-off relations with each other are reduced compared with the acceleration in case of all damping coefficient small (soft) and the displacement of isolated layer in case of all damping coefficient large (hard).

Key Words : Semi-Active Control, Response Evaluator, Base Isolation, Long-Period Earthquake Ground Motion

1. は じ め に

2003 年の十勝沖地震では、石油タンクの内容物が共振するスロッシング現象が原因で火災が発生し、長周期地震動による大規模構造物の被害⁽¹⁾に注目が集まった。その後、超高層建物や免震建物などの長周期構造物の長周期地震動に対する挙動が注目され、長周期地震動の発生メカニズムや発生確率が高いとされる海溝型地震の地震動予測手法、被害低減のための対策技術に対する研究開発が活発に行われている⁽²⁾。また、E-ディフェンスにおいて高層建物を模擬した実大試験体を用いて、長周期地震動を受ける高層建物の損傷過程の把握や応答低減手法の開発なども行われている⁽³⁾。

免震建物のセミアクティブ制御については、双線形最適制御理論⁽⁴⁾やスライディングモード制御⁽⁵⁾⁽⁶⁾によるオイルダンパの減衰係数切り替え制御⁽⁷⁾や、ゲインスケジュールド制御を適用した MR ダンパによるセミアクティブ免震⁽⁸⁾などがある。

一方、著者らは、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って応答評価器⁽⁹⁾の制御系設計を行い、これを免震装置に設置したオイルダンパの減衰係数切り替え制御に適用して、様々な特性を持つ地震波に対して、トレードオフ関係にある免震層変位と応答加速度の両方を低減する効果について検証を行ってきた⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。その際、同一性能を有する複数台のオイルダンパの減衰係数を同時に切り替える制御系を提案した。さらなる制御

* 原稿受付 2010 年 10 月 24 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 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1)

Email: fukukita@shimz.co.jp

性能の向上には個々のオイルダンパの制御性能を向上させることが必要になるが、オイルダンパの大型化には限界がある。

そこで、本研究では、同一性能のオイルダンパの減衰係数を個別に切り替える制御によって、オイルダンパ群全体としての制御性能向上をめざした、建物の応答評価に基づくセミアクティブ制御手法を提案する。対象として、将来の発生確率が高く、近年注目されている長周期地震動を取り上げ、これに対する免震構造物の応答低減をめざす。長周期地震動を受ける免震構造物は、免震層変位が大きくなり、El Centro や Hachinohe といった標準波をもとに各種の設定を行ってきた既存の免震構造物では、免震クリアランスを免震層変位が上回ったり、免震部材のエネルギー吸収能力が不足する恐れがあることが指摘されている⁽¹²⁾。本研究で目標とする制御性能は、免震層に設置した同一性能のオイルダンパの減衰係数をニューラルネットワークを用いて設計した制御系により 2 段階に切り替えることにより、応答加速度は減衰係数の上限値 (Hard) 固定時の応答より悪化させることなく、免震層変位を上限値 (Hard) 固定時より低減させることをめざす。その実現のためには、複数台あるオイルダンパの減衰係数を切り替えるタイミングを工夫し、全体として多段階の減衰性能を有するオイルダンパ群としての設計が必要となってくる。本研究では、ニューラルネットワークを用いた新しい制御系設計法を提案し、この設計法によりねらい通りの性能を実現できることを示す。

また、長周期地震動を受ける免震構造物は、長周期地震動の卓越周期と免震構造物の 1 次固有周期が近接していること、および、長周期地震動の継続時間が非常に長いことから、短周期成分が卓越する通常地震動の場合と異なり、1 次固有周期付近の周期で長い時間揺れることが想定される。その際の問題点としては、免震装置に設置されたダンパが多数回の繰り返し荷重を受けて発熱することで温度が上昇し、ダンパの減衰性能が低下することが考えられる。また、減衰性能の低下により、免震層の変位も過大になる可能性がある。そこで、本研究では、オイルダンパの発熱をなるべく小さく抑えるために、減衰係数の切り替えを行う応答評価器であるニューラルネットワークの結合重みを設計する際に用いる評価関数に、免震構造物の応答評価に加えてダンパのエネルギー吸収量を組み込む。

以上の提案する制御系の有効性を数値シミュレーションにより確認する。

2. 長周期地震動と免震構造物

2.1 長周期地震動の特徴

本論文で用いた長周期地震動は、海溝型の大規模地震に対して評価された地震波のうち、関東地震 (佐藤波)⁽¹³⁾、南海地震 (釜江波)⁽¹⁴⁾、東海地震 (土方波)⁽¹⁵⁾、東海・東南海地震 (中部波)⁽¹⁶⁾ の 4 波である。これらの地震波の加速度の最大値、継続時間⁽²⁾を表 1 に、減衰 5% の速度応答スペクトルを図 1 に示す。

2.2 免震構造物のモデル化

本論文では、図 2 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を解析対象とした。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 2 に示す。

オイルダンパは、図 3 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。オイルダンパの諸元を表 2 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。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 Long-period earthquake ground motion

EQ. No.	Earthquake	Max. Acc.(cm/s ²)	Duration time (s)
1	Kanto	499.2	24.0
2	Nankai	68.3	214.1
3	Tokai	127.2	75.9
4	Tokai-Tonankai	185.9	119.9

Fig. 1 Velocity response spectrum ($h = 5\%$)

Fig. 2 4-degree-of-freedom model

Table 2 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 Characteristics of variable oil damper

2.3 運動方程式と状態方程式

図 2 に示す免震構造物の運動方程式は次式となる．

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

$$m_1(\ddot{x}_1(t) + \ddot{x}_g(t)) + (c_1 + c_2)\dot{x}_1(t) + (k_s + k_1 + k_2)x_1(t) - c_2\dot{x}_2(t) - k_sx_0(t) - k_2x_2(t) = 0 \quad (3)$$

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

$$m_4(\ddot{x}_4(t) + \ddot{x}_g(t)) + c_4\dot{x}_4(t) + k_4x_4(t) - c_4\dot{x}_3(t) - k_4x_3(t) = 0 \quad (5)$$

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, 次式ようになる．

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

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

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

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, 非線形システムになる．次章では制御入力であるオイルダンパの減衰係数の切り替え則について述べる．

3. 建物の応答評価に基づく制御系設計

3.1 階層型ニューラルネットワーク

応答評価器⁽⁹⁾は, 建物の状態を観測し, その出力である建物の応答情報に基づいて制御目標を満たすように制御器の特性を変化させるものである．本論文では図 4 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) のオイルダンパの減衰係数 $c_s(t)$ を決定する．入力層は, 免震層変位と建物各層の絶対加速度の 5 ユニット, 中間層は 12 ユニット, 出力層は 4 台のオイルダンパ個別の切り替え信号の 4 ユニットとしている．これは, オイルダンパの切り替え信号は 4 台同時ではなく, 個別に設定することにより, 特性の異なる地震波に対して柔軟に対応できることをねらっている．各層の計算方法を以下に示す．

Fig. 4 Multi-layered neural network

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

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

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

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

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

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

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

ここで, w は結合重み, θ はしきい値を表す.

入力層に与える情報としては, 免震層変位は Soft の場合, 各層の絶対加速度は Hard の場合の最大値で正規化した値を用いた.

3.2 学習方法

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.

$$f_{fitq}(x) = f_{paq} f_{pdq} \left[\frac{1}{(\ddot{x}_4 + \ddot{x}_g)_{q\max}} + \frac{1}{(x_1)_{q\max}} + \frac{E}{E_{q\max}} \right] \quad (15)$$

$$E = \int_0^{t_0} c_s(t) \dot{x}_0(t) \dot{x}_1(t) dt \quad (16)$$

ここで, E はオイルダンパの吸収エネルギーである. 長周期地震動は, 地震波の最大加速度はそれほど大きくないものの, 継続時間が長く, 卓越する周期が長いので, 免震建物には, 多くの地震によるエネルギーが入力されることになる. そこで, 評価関数にオイルダンパの吸収エネルギーを考慮することにより, 応答の低減をはかった. また, 式 (15) 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, それぞれの地震波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

$$f_{paq} = \begin{cases} 1 & \left[A_q < (\ddot{x}_4 + \ddot{x}_g)_{q\max}^s \right] \\ 0.6 & \left[(\ddot{x}_4 + \ddot{x}_g)_{q\max}^s \leq A_q < (\ddot{x}_4 + \ddot{x}_g)_{q\max}^h \right] \\ 0.1 & \left[(\ddot{x}_4 + \ddot{x}_g)_{q\max}^h \leq A_q \right] \end{cases} \quad (17)$$

$$A_q = (\ddot{x}_4 + \ddot{x}_g)_{q\max}$$

• 免震層変位のペナルティ関数

$$f_{pdq} = \begin{cases} 1 & \left[D_q < (x_1)_{q\max}^h \right] \\ 0.6 & \left[(x_1)_{q\max}^h \leq D_q < (x_1)_{q\max}^s \right] \\ 0.1 & \left[(x_1)_{q\max}^s \leq D_q \right] \end{cases} \quad (18)$$

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

ここで、式 (17)、式 (18) の添え字 s, h は、それぞれ減衰係数が Soft(下限)、Hard(上限) の場合を示す。また、添字 q は表 1 に示す地震波を示す。式 (17)、式 (18) では、ダンパの減衰係数が一定のときの各地震波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、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。この手順を一世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。

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

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

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。

以上の学習を、表 1 に示すそれぞれの地震波に対して行い、各地震波ごとに応答評価器を設計した。

4. シミュレーション

表 1 の各地震波に対して設計した応答評価器を用いてシミュレーションを行い、制御効果を検討した。最上層の絶対加速度と免震層変位の最大値を図 5、図 6 にそれぞれ示す。図中の RE4 が応答評価器を用いて制御を行った場合である。図より、4 つの地震波のいずれに対しても、免震層の変位を Hard よりも低減しながら、最上層の絶対加速度を Hard と Soft の中間値に低減することができることがわかる。

図 7、図 8 に関東波 (EQ. No.1) の場合の時刻歴波形および各層の最大値分布をそれぞれ示す。図 7 より、減衰係数の切り替え信号である $p_1 \sim p_4$ は、3 章で設計した通り、それぞれが異なったタイミングで信号を出力している様子がわかる。それにとまって 4 台の合計の減衰係数 $c_s(t)$ は、4 台が同一のオイルダンパであるにも拘わらず、Soft と Hard の中間値をとっており、オイルダンパとしての減衰係数の選択の幅が広がっていることがわかる。また、図 8 より、免震層変位は Hard よりも低減しながら、各層の絶対加速度は Soft に近づくような応答低減を実現できていることがわかる。

図 9、図 10 に東海・東南海波 (EQ. No.4) の場合の時刻歴波形および各層の最大値分布をそれぞれ示す。東海・東南海波の場合も関東波の場合と同様に、減衰係数の切り替わりが適切に行われていること、各層の応答低減効果が表れていることがわかる。また、関東波に比べて減衰係数の切り替え回数が少ないが制御目標を達成できていることがわかる。

Fig. 5 Maximum acceleration of top story

Fig. 6 Maximum displacement of base isolation

評価関数にオイルダンパのエネルギー吸収量を考慮することの有効性を示すため、式 (15)、式 (16) のエネルギー吸収量に関する項 $E/E_{q\max}$ を除いた評価関数で学習し、その結果を基にシミュレーションした場合について、時刻歴波形を図 11 に示す。また、エネルギー吸収量を考慮した場合と比較して応答の最大値分布を図 12 に示す（以上、関東波）。同様に、東海・東南海波の場合の時刻歴波形を図 13 に、応答の最大値分布を図 14 にそれぞれ示す。関東波の図 7（評価関数にエネルギー吸収量を考慮した場合）、図 11（評価関数にエネルギー吸収量を考慮しない場合）、および図 12 より、両者は応答の最大値分布では大きな差は見られないが、評価関数にエネルギー吸収量を考慮しない場合は、オイルダンパの減衰係数の切り替え ($p_1 \sim p_4$) が頻繁に行われており、これはダンパの発熱の原因にもなる。また、評価関数にエネルギー吸収量を考慮した場合は考慮しない場合に比べて減衰係数の切り替え回数が約 24% 減少している。さらに、東海・東南海波の図 9、図 13、図 14 の比較からも関東波と同様になっており、切り替え回数は約 95% 減少していることがわかる。以上より、評価関数にオイルダンパのエネルギー吸収量を考慮した場合は、減衰係数の切り替え回数（ダンパの発熱）を抑えながら、応答低減を実現できており、評価関数の有効性が示された。

以上の結果から、本研究で提案した、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り設計した応答評価器を用いて、オイルダンパの減衰係数を切り替えることにより、免震建物の免震層変位と各層の絶対加速度を、オイルダンパの減衰係数を Hard または Soft で一定にする場合に比べて有効に低減できることがわかった。また、評価関数にオイルダンパのエネルギー吸収量を考慮することにより、応答低減を実現しつつ、減衰係数の切り替え回数を減らしてダンパの発熱を抑えることができ、提案した評価関数の有効性を検証した。

5. 結 言

本研究では、長周期地震動に対する免震構造物の応答低減をめざして、応答評価器によるセミアクティブ制御の検討を行った。4 波の長周期地震動のそれぞれに対して応答評価器を設計し、これを用いて免震層に設置したオイルダンパの減衰係数を 2 段階に切り替えるセミアクティブ制御を行った。長周期地震動を受ける免震構造物では、揺れの継続時間が長くなり、オイルダンパの減衰性能が繰り返し荷重による発熱で低下してしまうことが懸念される。それを防ぐために制御系設計の際には、ダンパの吸収エネルギー量を考慮した。以上の制御より、各ダンパの減衰係数が切り替わるタイミングが異なり、その結果、多段階の減衰性能を有するオイルダンパ群が実現された。これにより、オイルダンパの減衰係数を上限 (Hard) または下限 (Soft) で一定とする場合の建物応答に比べて、建物最上層の絶対加速度を Hard と Soft の中間値に抑制しつつ、免震層変位を Hard よりも低減できることがわかった。また、オイルダンパのエネルギー吸収量を評価関数に取り入れることにより、4 台すべての減衰係数の切り替わりがそれほど頻繁に行われることなく制御目標を達成することができた。

Fig. 7 Waveforms of structural response with consideration for the energy absorption of the oil damper in the criterion function (Kanto)

Fig. 8 Maximum distribution of structural response with consideration for the energy absorption of the oil damper in the criterion function (Kanto)

Fig. 9 Waveforms of structural response with consideration for the energy absorption of the oil damper in the criterion function (Tokai-Tonankai)

Fig. 10 Maximum distribution of structural response with consideration for the energy absorption of the oil damper in the criterion function (Tokai-Tonankai)

Fig. 11 Waveforms of structural response without consideration for the energy absorption of the oil damper in the criterion function (Kanto)

Fig. 12 Maximum distribution of structural response compared with the presence or absence of considering the energy absorption of the oil damper in the criterion function (Kanto)

Fig. 13 Waveforms of structural response without consideration for the energy absorption of the oil damper in the criterion function (Tokai-Tonankai)

Fig. 14 Maximum distribution of structural response compared with the presence or absence of considering the energy absorption of the oil damper in the criterion function (Tokai-Tonankai)

文 献

- (1) 畑山健, 座間信作, 西晴樹, 山田寛, 廣川幹浩, 井上涼介, “2003 年十勝沖地震による周期数秒から十数秒の長周期地震動と石油タンクの被害”, 地震 第 2 輯, Vol.57, No.2 (2004), pp.83-103.
- (2) 日本建築学会, “長周期地震動と建築物の耐震性”, 日本建築学会, 2007.
- (3) 防災科学技術研究所, “平成 20 年度「都市施設の耐震性評価・機能確保に関する研究」成果報告書” (<http://www.bosai.go.jp/hyogo/syuto-pj/0907result20.html>)
- (4) 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.
- (5) 三東儀洋, 鈴木隆典, 吉田和夫, “外乱包含双線形最適切り換え面を用いたスライディングモードセミアクティブ免震”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.674 (2002), pp.2851-2858.
- (6) 長島一郎, 篠崎洋三, 欄木龍大, 讃井洋一, 北川良和, “可変減衰オイルダンパーを用いた免震構造物のスライディングモード制御”, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.649 (2010), pp.511-519.
- (7) 篠崎洋三, ほか, “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.
- (8) 渡壁守正, 井上波彦, 西村秀和, 龍神弘明, 仲宗根淳, 中村佳也, 長屋雅文, 金川基, “多自由度系免震構造物に適用した MR ダンパによるセミアクティブ (GS) 制御性能”, 日本建築学会構造系論文集, No.628 (2008), pp.875-882.
- (9) 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 CD-ROM 論文集 (2007), Paper No.838.
- (10) 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.
- (11) 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 (2009), pp.2917-2925.
- (12) 北村春幸, 東野さやか, 竹中康雄, 田村和夫, “長周期地震動による既存免震建物の耐震性能評価”, 日本建築学会技術報告集, Vol.22 (2005), pp.127-132.
- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) 土方勝一郎, 植竹富一, 金谷淳二, 真下貢, 早川崇, 渡辺基史, 佐藤俊明, “想定東海地震の東京湾岸における長周期地震動予測”, 日本建築学会構造系論文集, No.617 (2007), pp.55-62.
- (16) 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.