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*福喜多 輝^{*1}, 高橋 正樹^{*2}Semi-Active Control for Isolated Structure Based on Response Evaluator of
System Respected to the Source Region and Ground Motion of EarthquakeAkira FUKUKITA^{*3} and Masaki TAKAHASHI^{*3} 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. The characteristics of the response evaluator is designed with the source region and ground motion of earthquake. It is applied to a base isolated structure with a semi-active oil damper whose damping coefficient has large or small values. The response evaluator is 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. Some earthquake records are divided into 8 regions by the epicenter, and the representative record of each region is normalized to 3 levels of its peak velocity which is 25, 50 and 75 cm/s. The 8 response evaluators are designed for each earthquake region and the computer simulations are carried out. Absolute acceleration and relative displacement of each story are reduced when the response evaluator corresponding to the designed region is used, but the control performance is not so good used by the most of response evaluators designed at the other region. When the response evaluator is selected corresponding to the designed region and the appropriate criterion function is set, good control effect is obtained to the wide range of amplitude of earthquake.

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

1. はじめに

地震の多い日本では、中央防災会議において、将来発生が予想される地震に対して、被害の推定や防災対策の策定などを行っている⁽¹⁾。これに対応して自治体や企業においても地震による被害を軽減するために様々な取り組みがなされている。この中には、企業独自の地震観測網を利用した安全管理システムなどもある⁽²⁾⁽³⁾。

一方、気象庁は、2007年10月1日より緊急地震速報⁽⁴⁾の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、現在までにいくつもの地震においてその有用性が確認されている⁽⁵⁾。

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、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。例えば、学校における利活用⁽⁶⁾や地下街での避難⁽⁷⁾、工場の生産ライン停止や作業員の安全確保⁽⁸⁾、建設現場における作業員の安全確保やタワークレーン、仮設エレベータの緊急停止⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、超高層建物におけるエレベータの緊急停止⁽¹¹⁾、電力施設の防災への応用⁽¹²⁾、石油精製施設の緊急停止への応用⁽¹³⁾などがある。これらは、主に主要動が到達する前に危険回避行動を取ることを目標としている。しかし、震源が近い場合に、緊急地震速報の配信前に主要動が到達してしまう問題もあるため、それを改善する目的で独自に設置した地震計と緊急地震速報を組み合わせた複合システム⁽¹⁴⁾の研究も行われている。また、日常は構造ヘルスマニタリング機能を保有し、地震時は緊急地震速報と独自観測網からなる地震警報システムを併せた複合システム⁽¹⁵⁾に関する研究も行われている。今後、緊急地震速報が実システムで活用されるためには、速報の精度や信頼性の向上が必須となるため、これに関する研究も活発に行われている⁽¹⁶⁾。

* 原稿受付 2009年4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)。

E-mail: fukukita@shimz.co.jp

このような背景から、今後はより高い精度で地震に関する情報が地震動到達前に提供されることが期待されるため、この仕組みを用いた制御システムの構築には意義がある。緊急地震速報、あるいはこれと同様の機能を有する独自のシステムを用いた免震、制震に関する研究例としては、藤田ら⁽¹⁷⁾の空気ばねで構成されたアクティブ免震システムのばね作動のトリガへの応用、Kobori, et al.⁽¹⁸⁾の独自の地震観測網の情報より地震動の振動数成分を分析し、地震到達前に建物の剛性を変化させ地震動との共振を回避する可変剛性システム、折田ら⁽¹⁹⁾の大学構内の独自の地震観測網データに基づくフィードフォワード制振、などがあるが、例は少ない。

著者らは、非定常な性質を持つ地震動に対して、システムの応答を積極的に評価して制御入力を決める応答評価器⁽²⁰⁾を提案し、減衰係数を2段階に切り替え可能なオイルダンパを有するセミアクティブ免震建物に適用した結果、建物の加速度、免震層の変位の応答低減に効果があることをシミュレーションにより確認した⁽²¹⁾。その際、地震動の情報を用いず建物応答のみからダンパの減衰係数を決定した。

本研究では、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し、制御性能の向上を図る。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。以上より、地震の地域性と揺れの大きさを考慮した応答評価が可能となる。

本論文の2章では、過去の観測記録を基に行った地震の領域分けの手順と、緊急地震速報を用いた地表の最大速度の推定方法について述べる。3章では、制御対象の免震構造物のモデル化と定式化について述べる。4章では、地震の震源位置と地表の最大速度を用いた応答評価器の設計方法について述べる。5章では、応答評価器を用いたシミュレーションを行い、制御効果を検証した結果を述べ、6章でまとめを行う。

2. 地震の発生領域と地表の最大速度の推定

2.1 地震の発生領域 建物の建設地において観測される地震動の特性は、当該敷地の地盤特性と発生した地震の震源位置による影響を受ける。本研究では、約25年間に東京都江東区越中島で観測した地震記録⁽²⁴⁾を用いて、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/s^2 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1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の偏りのないもの、を基準として代表地震動を選定した。表1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。

2.2 緊急地震速報を用いた地表速度の推定 地震の到達前に地表速度を推定してこれを応答評価器への入力情報として与えることで、小～大振幅までの地震入力に対して応答評価器が適切に制御を行い、建物の応答低減効果の向上が期待できる。ここでは、緊急地震速報の情報を用いた場合の地表速度の最大値を推定する手順を示す。

はじめに、式(1)に示す地震動の最大速度に対する司・翠川の距離減衰式⁽²⁵⁾を用いて、基準基盤(S波速度 600m/s の硬質地盤)の最大速度 V_{600} を求めた。

$$\log V_{600} = 0.58M_w + 0.0038D_e - 1.29 - \log(X + 0.0028 \times 10^{0.50M_w}) - 0.002X \quad (1)$$

ここで、 V_{600} : 基準基盤における最大速度、 M_w : モーメントマグニチュード、 D_e : 震源深さ(km)、 X : 断層最短距離(km)である。緊急地震速報では、気象庁マグニチュード M_J が与えられるため、これをモーメントマグニチュードに換算するには以下の式を用いた⁽²⁶⁾。

$$M_w = M_J - 0.171 \quad (2)$$

また、断層最短距離 X は、気象庁マグニチュード M_J から相似則により予測される断層長さ L を以下の式を用いて求め⁽²⁷⁾、その $1/2$ を半径とする球を設定し、その球面から当該地直下の基準基盤までの距離とした。

$$\log L = 0.5M_J - 1.85 \quad (3)$$

次に、松岡・翠川⁽²⁸⁾の速度増幅度の計算式を用いて基準基盤から工学的基盤(S波速度 400m/s)までの最大速度の増幅率を求めると1.31となるため、工学的基盤の

Table 1 List of earthquake motions

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

最大速度 V_{400} は、次式から求められる。

$$V_{400} = 1.31 \times V_{600} \quad (4)$$

さらに、地表の最大速度 V_g は、国土数値情報から得られる当該地の地盤増幅率 ARV を式 (4) で求めた工学的基盤の最大速度に乗ずることによって求めた。

$$V_g = ARV \times V_{400} \quad (5)$$

以上より、実際に地震が発生した際に緊急地震速報の情報から、当該地に地震が到達する前に地表速度が得られるときには、実際に制御を行う際に応答評価器の入力情報として用いることができ、振幅レベルの違う地震にも対応可能である。

3. 免震構造物のモデル化と定式化

本論文では、最下層に天然ゴム系積層ゴムとオイルダンパを設置した、10階建ての免震構造物⁽²¹⁾を解析対象とした。オイルダンパは、減衰係数を Hard ($c_{s\max} = 14.7 \times 10^6$ Ns/m) または Soft ($c_{s\min} = 0.8 \times 10^6$ Ns/m) の2段階に切り替え可能とし、ばね ($k_s = 29.4 \times 10^6$ N/m) とダッシュポットを直列に接続した Maxwell モデルとした。また、時間遅れを1次遅れ系でモデル化(時定数:30 msec)している。免震構造物のモデル図を図2に、諸定数を表2に示す。オイルダンパの軸変位 $x_0(t)$ 、建物各層の地面からの相対変位 $x_i(t)$ 、相対速度 $\dot{x}_i(t)$ を状態量とし、地動加速度を $\ddot{x}_g(t)$ とすると、免震構造物モデルの状態方

Fig. 1 Epicenter and maximum velocity at the observed station

程式、制御入力 $u(t)$ は以下のようにになる⁽²¹⁾。

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

$$x_s(t) = [x_0(t) \ x_1(t) \ \cdots \ x_{10}(t) \ \dot{x}_1(t) \ \cdots \ \dot{x}_{10}(t)]^T \quad (7)$$

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

4. 応答評価器の制御系設計

本章では、領域ごとに設計する応答評価器の設計方法について述べる。はじめに、ニューラルネットワークの構造と入力として用いる情報について述べる。次に、建物当該地の地震動の最大速度の推定値に応じたシステム応答評価を実現するためのニューラルネットワークの学習方法について述べる。

4.1 階層型ニューラルネットワーク 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するような制御器を設計するために、図3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。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。

4.2 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 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。

はじめに、ダンパの減衰係数が Soft および Hard で一

Fig. 2 Structural model with oil dampers

Table 2 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

$\bigcirc$: Linear Neuron $\odot$: Sigmoid Neuron $\oplus$: Threshold Neuron

Fig. 3 Multi-layered Neural Network

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 は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以下のように学習を行う。図 3 の各層間の結合重み 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。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。

$$f_{fit}(x) = \sum_{q=1}^3 f_{fitq}(x) \quad (15)$$

$$f_{fitq}(x) = \frac{f_{paq}}{(\ddot{x}_{10} + \ddot{x}_g)_{q\max}} \times \frac{f_{pdq}}{(x_1)_{q\max}} \quad (16)$$

式 (15) 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能を発揮することが期待される。また, 式 (16) 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

$$f_{paq} = \begin{cases} 1 & \left[A_q < (\ddot{x}_{10} + \ddot{x}_g)_{q\max}^s \right] \\ 0.4 & \left[(\ddot{x}_{10} + \ddot{x}_g)_{q\max}^s \leq A_q < (\ddot{x}_{10} + \ddot{x}_g)_{q\max}^h \right] \\ 0.1 & \left[(\ddot{x}_{10} + \ddot{x}_g)_{q\max}^h \leq A_q \right] \end{cases} \quad (17)$$

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

● 免震層変位のペナルティ関数

$$f_{pdq} = \begin{cases} 1 & \left[D_q < (x_1)_{q\max}^h \right] \\ 0.6 & \left[(x_1)_{q\max}^h \leq D_q < (x_1)_{q\max}^s \right] \\ 0.2 & \left[(x_1)_{q\max}^s \leq D_q \right] \end{cases} \quad (18)$$

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

ここで, 式 (17), 式 (18) の添え字 s, h は, それぞれ減衰係数が Soft, Hard の場合を示す。式 (17), 式 (18) 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, 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 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, $p(t)$ 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 (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 に示す各領域の代表地震動のそれぞれに対して, レベル 1, 2, 3 ($q=1, 2, 3$) に基準化した波形を用いて行い, 各領域ごとに応答評価器を設計した。

5. シミュレーション

5.1 学習波に対する結果 各領域において, 表 1 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, 地震動の波形を図 4 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 5 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 4 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。また, 図 5 より, 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。

また, 領域, 地震動のレベルが異なる例として, 図 6, 図 7 には, 領域 7 におけるレベル 1 の地震動の場合の結果を示す。ここでも, 各層の絶対加速度を Soft と同様に抑えつつ, 免震層変位は Soft よりも低減することができており, セミアクティブ制御の効果が表れている。以上の傾向は, 他の領域でも同様に見られることから, 領域ごとに設計した応答評価器が, 学習に使用した地震動に対して建物の応答低減に有効に作用していることがわかった。

Fig. 4 Waveforms of response (Region 4, Level 2)

Fig. 5 Maximum value of response (Region 4, Level 2)

5.2 未学習波に対する結果

5.2.1 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1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1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8に示す. 図5の学習波の場合に比べて, 制御性能

Fig. 6 Waveforms of response (Region 7, Level 1)

Fig. 7 Maximum value of response (Region 7, Level 1)

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おり, 目標の性能を満たしている. 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.

5.2.2 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1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9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10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。

5.3 シミュレーションのまとめ 各領域で設計した応答評価器と代表地震動(表1の○, レベル1)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3にまとめた。

- ◎ : 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
- × : 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

5.1 節に例を示したように、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3の対角項)。また、5.2.2 項に一例を示したように、学習していない違う領域の地震動に対しては、領域1の応答評価器では Hard と Soft の中間値(○)になっている場合が多いが、他の領域の応答評価器は、設計した領域と違う地震動に対しては制御性能が低下することが多く、応答評価器のロバスト性が低い(表3の縦)。

また、地震動とは異なる領域の応答評価器を用いた場合は、制御性能の低下が見られ、特に地震動が領域1, 4, 6, 8 の時に制御性能が悪くなっている(表3の横)。地震動が領域2, 7 では、中間値(○)が多いものの、主に加速度で Hard を超える場合(×)が多くなっている。一方、地震動が領域3, 9 では、どの応答評価器でもほぼ Hard と Soft の中間値(○)になっている。

以上の結果は、地震の発生領域によって、観測点における地震動の特性が異なるため、その特性に合わせた応答評価器を用いた場合は制御性能がよくなるが、そうでない場合は制御性能が悪くなる場合が多くなっていると考えられる。

以上より、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方が、異なる領域の応答評価器を用いて制御を行うよりも建物の応答低減に効果があることが

Fig. 8 Maximum value of response (Earthquake: Region 4-2, Response evaluator: Region 4, Level 2)

Fig. 9 Maximum value of response (Earthquake: Region 1, Response evaluator: Region 4, Level 2)

Fig. 10 Maximum value of response (Earthquake: Region 1, Response evaluator: Region 1, Level 2)

Table 3 Control performance

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	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○

わかった。また、地震動の最大速度を入力情報として用いたニューラルネットワークによって設計した応答評価器は、小振幅から大振幅までの地震動に対して制御を効果的に行うことができることがわかった。

また、これらのことから、実際に地震が発生した際には、緊急地震速報などで得た震源情報（震源位置とマグニチュード）と建物当該地での地表の最大速度を推定し、地震到達前に発生領域に応じた応答評価器を選択することで、単一の応答評価器で制御する場合に比べて制御性能が向上することを示した。

6. 結 言

本研究では、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を提案した。具体的には、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の際、地震の震源位置を基に複数の領域を設定し、それぞれの領域で発生した地震に対応した応答評価器を設計した。パラメータ調整に用いた地震動、その地震動と同じ領域内で発生した別の地震動、他の領域で発生した地震動のそれぞれに対して応答評価器の制御性能を確認した。これらの結果の比較から、領域に応じた応答評価器を使用することにより制御性能が確保できるが、対応しない応答評価器を使用すると制御性能が低下することがわかった。また、地表の最大速度を入力情報として使用することにより、振幅レベルの異なる地震動に対して制御を効果的に行うことができた。

以上より、実際に地震が発生した際には、緊急地震速報や独自の地震観測網などを利用して、地震到達前に震源情報を取得し、それに応じて応答評価器を選択

することで、制御性能が向上することを示した。

文 献

- (1) Cabinet Office, Government of Japan, "Antiearthquake Measures" (online), available from <<http://www.bousai.go.jp/5jishin/index.html>>, (accessed 2009-4-10).
- (2) Nabana, K., Hosokawa, N. and Yamauchi, A., The report about use example of an earthquake measurement result by 'SUPREME' for a prevention of secondary disaster, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.7, No.2 (Special Issue) (2007), pp.209-214.
- (3) Nakamura, Y., Research and Development of Intelligent Earthquake Disaster Prevention Systems UrEDAS and HERAS, *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, No.531/I-34 (1996), pp.1-33.
- (4) Japan Meteorological Agency, "Earthquake Early Warnings" (online), available from <<http://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/eeew.html>>, (accessed 2009-4-10).
- (5) Japan Meteorological Agency, "Usage of Earthquake Early Warnings on The Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007" (online), available from <<http://www.jma.go.jp/jma/press/0708/02b/070802chuetsuoki.ryou.pdf>>, (accessed 2009-4-10) (in Japanese).
- (6) Motosaka, M. and Manabe, S., Questionnaire Investigation for Extensive Utilization of Real-time Earthquake Information in Schools, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, B-2, Structures II, Structural Dynamics, Nuclear Power Plants* (2007), pp.663-664.
- (7) Motosaka, M. and Yamaya, H., Evacuation Simulation in Underground Space Using Real-time Earthquake Information, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, B-2, Structures II, Structural Dynamics, Nuclear Power Plants* (2006), pp.397-398.
- (8) Yoshioka, K., Study on Application of Earthquake Early Warnings at Semiconductor Factory, *Bulletin of JAEE*, No.7 (2008), pp.16-18 (in Japanese).
- (9) Nasu, T., Miyamura, M., Takahashi, M., Kanda, K. and Yamaya, H., An Application to Construction Sites of Earthquake Early Warning System (1),(2), *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, B-2, Structures II, Structural Dynamics, Nuclear Power Plants* (2006), pp.127-130.

- (10) Yasui, M., Tohdo, M., Kaneko, O., Kazuki, H. and Inai, S., Safety Control Systems of Construction Sites on Real-time Earthquake Informations, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, B-2, Structures II, Structural Dynamics, Nuclear Power Plants* (2007), pp.595-596.
- (11) Kubo, T. and Hisada, Y., Study on Earthquake Disaster Mitigation of High-Rise Building of University Campus in Tokyo, Japan, by collaborating with local communities, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, B-2, Structures II, Structural Dynamics, Nuclear Power Plants* (2008), pp.823-824.
- (12) Abe, S., Ogata, Y., Inubushi, H. and Saita, J., Study on High-Reliability of Real-time Seismic Observation System, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, B-2, Structures II, Structural Dynamics, Nuclear Power Plants* (2008), pp.793-794.
- (13) Nakamura, T., Takagi, M., Shiba, Y. and Sakashita, K., A Study on Shutdown Trigger Level for Petroleum Refinery Facilities Using the Real-time Seismic Information, *Proceedings of the Japan Earthquake Engineering Symposium* (2006), pp.1330-1333.
- (14) Abe, M., Kanda, K. and Miyamura, M., Study on on-site earthquake early warning from the beginning of P-wave, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, B-2, Structures II, Structural Dynamics, Nuclear Power Plants* (2007), pp.659-662.
- (15) Motosaka, M., Homma, M., Kuyuk, S. and Arrecis, F., Development of an Integrated Early Warning and Structural Health Monitoring System to Real Time Earthquake Information, *Journal of Architecture and Building Science* (2008), No.28, pp.675-678 (in Japanese).
- (16) Kanda, K., Study on Earthquake Early Warnings System with Self-Learning Function Using Neural Networks, *Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan*, No.498 (1997), pp. 59-66.
- (17) Fujita, S. and Minagawa, K., Study on Application of Earthquake Early Warnings to Base Isolation System of Industrial Equipment, *Bulletin of JAEE*, No.7 (2008), pp.12-15 (in Japanese).
- (18) Kobori, T., Takahashi, M., Nasu, T. and Niwa, N., Seismic Response Controlled Structure with Active Variable Stiffness System, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22(11), 1993, pp.925-941.
- (19) Orita, J., Kanakubo, T. and Sakai, Y., Fundamental Study on Feedforward Type Control System using Real-Time Earthquake Motion Network, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.7, No.1 (2007), pp.61-78.
- (20) 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).
- (21) Fukukita, A., Takahashi, M. and Yoshida, K., Semi-Active Control for Isolated Structure Using Variable Damping Device Based on Response Evaluator of System, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.75, No.752 (2009), pp.865-873.
- (22) Yokota, H., Shiba, K., Okada, K. and Tanaka, T., Characteristics of Earthquake Motions Observed in Stiff Silt Layer in the Center of Tokyo (Part 1), *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, B, Structures I* (1986), pp.393-394.
- (23) Nasu, N., Takeuchi, M., Morioka, T., and Yamada, M., Some Characteristics of the Earthquake Ground Motions Experienced in Tokyo (Part 2), *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan* (1981), pp.511-512.
- (24) Yokota, H. and Okada, K., A Study of Characteristics of Maximum Acceleration Amplitude and Maximum Velocity Amplitude Observed in Stiff Silt Layer in the Center of Tokyo (Part 1), *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, B, Structures I* (1985), pp.67-68.
- (25) Si, H. and Midorikawa, S., New Attenuation Relationships for Peak Ground Acceleration and Velocity Considering Effects of Fault Type and Site Condition, *Journal of Structural and Construction Engineering, Architectural Institute of Japan*, No.523 (1999), pp.63-70.
- (26) Utsu, T., Relationships between Earthquake Magnitude Scales, *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, Vol.57 (1982), pp.465-497.
- (27) Utsu, T., Seismology (in Japanese), (1977), Kyoritsu Shuppan Co. LTD.
- (28) Matsuoka, M. and Midorikawa, S., Digital Nation Land Information and Seismic Microzonation, *22th Symposium of Ground Response*, (in Japanese), (1994), pp.23-34.