

MRダンパーによる長大斜張橋の制震

北村幸嗣¹・畑中章秀²・生田目尚美³

^{1,3}正会員 工修 Hitz日立造船株式会社 技術研究所（〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11）

²正会員 工博 Hitz日立造船株式会社 技術研究所（〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11）

1. はじめに

長大橋の耐震対策を考えた場合、何らかのエネルギー吸収機構を用いることが有効であると考えられる。これまでは、パッシブ型の制震機構である弾性拘束ケーブル、ベーン型オイルダンパー等が用いられてきた。ギリシャで建設中の斜張橋では、1基3000kNのシリンダー型オイルダンパーを用いる計画がなされている¹⁾。

一方、近年、セミアクティブ型の制震装置であるMRダンパー（磁気粘性流体ダンパー。印加電流の変化により減衰力をリアルタイムに制御できる）を建築や土木構造物に適用する研究が行われてきている^{2)～7)}。

本論では、長大橋にMRダンパーを適用した場合の有効性を検討することを目的に、橋軸方向の支配的モードである遊動円木モードの1自由度系を用いた解析を行う。制震効果は、MRダンパーの制御則に大きく依存すると考えられるが、ここでは最適制御理論およびスライディングモード制御理論に基づくセミアクティブ制御則を用いる。そして、これらの制御則によるMRダンパーを適用した場合とオイルダンパーのようなパッシブ型の粘性減衰ダンパーを適用した場合の地震応答の比較を行う。

2. 解析モデル

(1) 対象橋梁とその遊動円木モード

解析の対象とする橋梁は、図-1に示すような橋長1000m、主桁重量約2万tの斜張橋で、主塔と主桁の交差部および桁端部にダンパーを設けるものとする。

対象橋梁の遊動円木モードは、4次モードで、固有周期は3.1秒である。図-2にモード図を示す。解析にはこのモードを用いる。なお、今回は基本検討のために、MRダンパーの粘性変化による橋梁の固

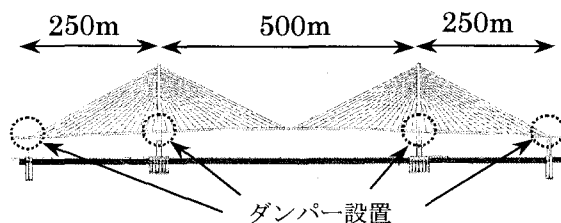


図-1 対象斜張橋

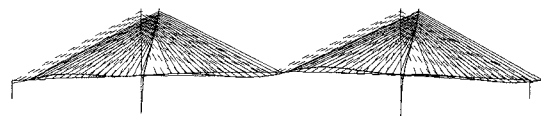


図-2 4次固有モード
(遊動円木モード、3.1秒)

有振動特性（複素固有モード）の変化を考慮していない。

(2) 状態方程式

モード分解した運動方程式は、

$$\ddot{q}_s + 2h_s \omega_s \dot{q}_s + \omega_s^2 q_s + \frac{f_s}{m_s} = -\beta_s \ddot{x}_g, \quad s=1 \sim N \quad (1)$$

ここで、 $q_s, h_s, \omega_s, m_s, f_s, \beta_s$ は、それぞれ s 次モードの一般化変位、減衰定数、固有円振動数、一般化質量、一般化ダンパー力、刺激係数で、 $\ddot{x}_g$ は地動加速度である。ここで、 $\dot{q}_s = \dot{r}_s$ として、4次モードの運動方程式を次式の状態方程式の形に表す。

$$\begin{Bmatrix} \dot{q}_4 \\ \dot{r}_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_4^2 & -2h_4\omega_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_4 \\ r_4 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ -1/m_4 \end{Bmatrix} f_4 + \begin{Bmatrix} 0 \\ -\beta_4 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (2)$$

まとめて、

$$\dot{\mathbf{x}}_4 = \mathbf{A}_4 \mathbf{x}_4 + \mathbf{B}_4 f_4 + \mathbf{E}_4 \ddot{x}_g \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{x}_4, \mathbf{A}_4$ はそれぞれ状態ベクトル、状態マトリクス。式(3)を用いて応答解析を行う。解析プログラムにはMATLABを用いた。

3. ダンパーのモデル化

オイルダンパーのモデル化は、図-3 に示すように速度比例の非線形粘性減衰型とし、速度 2m/s のときに設計最大ダンパー力 1000kN に達するものとする。粘性係数 C_1 を様々にとる検討を行い、最もよいものを選択する。

MRダンパーのモデル化は、現在実現されている最大の容量である 400kN MRダンパー（三和テッキ社製）の履歴結果⁸⁾を参考にして、図-4 に示すようにビンガムモデルを用いて設定した。細線と太線は、印加電圧(電流)がそれぞれ 0 のとき、最大のときの速度-減衰力関係を示す。こちらも印加電流最大時の速度 2m/s のときに設計最大ダンパー力 1000kN に達するものとする。別途、Bouc-Wen モデル⁹⁾による検討も数例行ったが、最大地震応答値に大きな差異は認められなかった。

ダンパーは、対象橋梁に計 20 基を搭載するものとした（設計総最大ダンパー力 20000kN）。

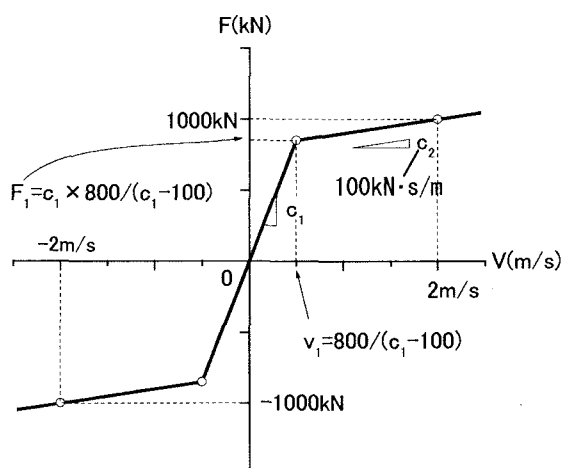


図-3 オイルダンパーのモデル化
(非線形粘性減衰型)

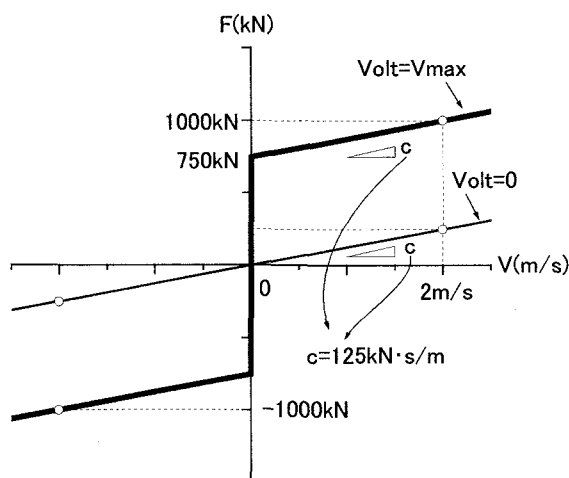


図-4 MRダンパーのモデル化
(ビンガム型)

4. MRダンパーの制御則

(1) 制御理論

a) 最適制御理論¹⁰⁾

最適制御理論における制御力 $u(t)$ は、状態量

$\{x_s\}$ （センサーにより得られる構造物の応答）に
適当な係数 k をかけたものとし、次式で与えられる。

$$u(t) = -[K]\{x_s\} = -k_1 x_s(t) - k_2 \dot{x}_s(t) \quad (4)$$

ただし、 $[K]$ はフィードバックゲイン。

ここではフィードバックゲインは、LQ 最適制御理論に基づき決定する。評価関数 J は橋の応答と制御力に対し、 Q と R の重み係数を与える次の 2 次形式を用いた。

$$J = \int_0^{\infty} [x(t)^T Q x(t) + R \{u(t)\}^2] dt \quad (5)$$

ただし、 Q は状態ベクトルにかかる重み行列で、 R は制御力にかかる重み行列。評価関数 J が最小となるような制御力 u は次式のように与えられる。

$$u = -R^{-1}[B]^T [P]\{x_s\} = -[K]\{x_s\} \quad (6)$$

ただし、 P はリカッチ方程式を満たす正定な解。

LQ 最適制御理論では、式 (5) の重み係数行列 Q と R を適当に与えることによって振動特性と入力エネルギー消費とのバランスを取ることができ、最適なフィードバックゲイン $[K]$ を求めることができる。

例えば、 Q を一定として、 R を小さくすれば制御力が大きくなり、良好な制震効果が得られる反面、大きなエネルギーが要求される。また、 Q は相当する応答値に応じて定める。

b) スライディングモード制御¹⁰⁾

スライディングモード制御（以下 SMC と略記）は、システムの状態量を切り替え面と呼ばれる超平面に拘束し、状態量をその面上ですべらせて平衡点（この場合原点）に収束させる方法である。すべり状態の実現により、系のパラメータ変動、非線形項、未知パラメータ等に対してロバストな制御系の設計ができることが着目されている。

切り替え面を表す式は

$$\sigma = S x_s \quad (7)$$

ここで、 σ は切り替え関数、 S が切り替え面の傾きである。 S の決め方はいくつかあるが、ここでは、

最適制御問題を解く方法によった。

S が決まると、スライディングモード制御による制御力 u は

$$u = u_l + u_{nl}$$
$$= -(S B_s)^{-1} S A_s x_s - k(x, t) \frac{\sigma}{\|\sigma\|} \quad (8)$$

ここで k は非線形項の大きさを決める係数である。これから分かるように、切り替え関数 σ の符号により制御力が切り替わる。

(2) クリップド・オプティマル則

上記の最適制御理論、スライディングモード制御理論から導かれる制御力指令値は、フルアクティブの値であり、速度と反対方向にのみ減衰力が発揮できるMRダンパーにおいては、制御力指令値が速度方向の場合は印加電圧を 0 とする必要がある。また、発揮できる方向の制御力であっても実際にダンパーで出ている減衰力は異なり、指令値にトラッキングする必要がある。これらの処理を行うため、式(9)により示されるような、印加電圧を最大と 0 に切り替えるクリップド・オプティマル則²⁾を用いる。

$$v = V_{\max} H\{(f_c - f_i) f_i\} \quad (9)$$

ここで、 v, f_c, f_i は、それぞれ、印加電圧、制御力指令値、実際出ている減衰力で、 $H(\cdot)$ はヘビサイドステップ関数である。

5. 入力地震波

地震波データは、エルセントロ波(1940 年)NS成分と神戸海洋気象台波(1995 年)NS成分、JR鷹取波(1995 年)NS成分、集集地震TCU084波(1999)EW成分の4波を用いた。表-1に各波のデータ最大値を示す。時刻歴計算の時間刻みは0.005sとしたが、地震波データがこのピッチでないものは線形補間によった。

表-1 入力地震波

地震波名	最大 加速度 (Gal)	最大 速度 (cm/s)	最大 変位 (cm)
エルセントロ	307	29	12.8
神戸海洋気象台	818	81	17.7
JR鷹取	599	127	35.8
集集地震TCU084	984	143	152.9

6. 解析結果

(1) オイルダンパーの粘性係数

オイルダンパーの粘性係数 C_1 を様々にとった場合の主桁の水平最大応答変位および最大ベースシア(主塔基部のせん断力、2塔分の合計)を図-5に示す。各地震波の結果とも粘性係数の影響は小さいことが分かる。粘性係数が大きいほど応答が小さくなる傾向があることから最適な粘性係数として $C=2000 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$ を選び、この場合の結果をMRダンパーを適用した場合との比較に用いる。

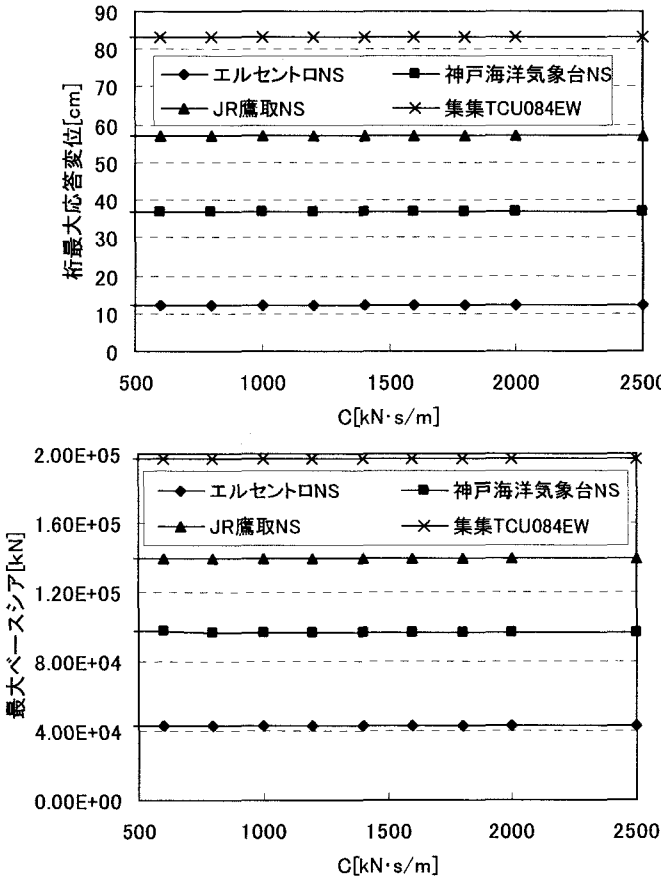


図-5 オイルダンパーにおける粘性係数の影響

(2) 時刻歴の応答

オイルダンパーとMRダンパーを適用した場合の時刻歴の応答例として、JR鷹取波を入力した場合の主桁水平変位とベースシア(2塔分合計)の応答波形を図-6に示す。

主桁水平変位については、主要動を含む最初の10秒までは、オイルダンパーと最適制御のMRダンパーとSMCのMRダンパーの場合で、ほぼ同じ時刻歴となっており、それ以降ではSMCのMRダンパーの場合の収束が遅い結果となっている。

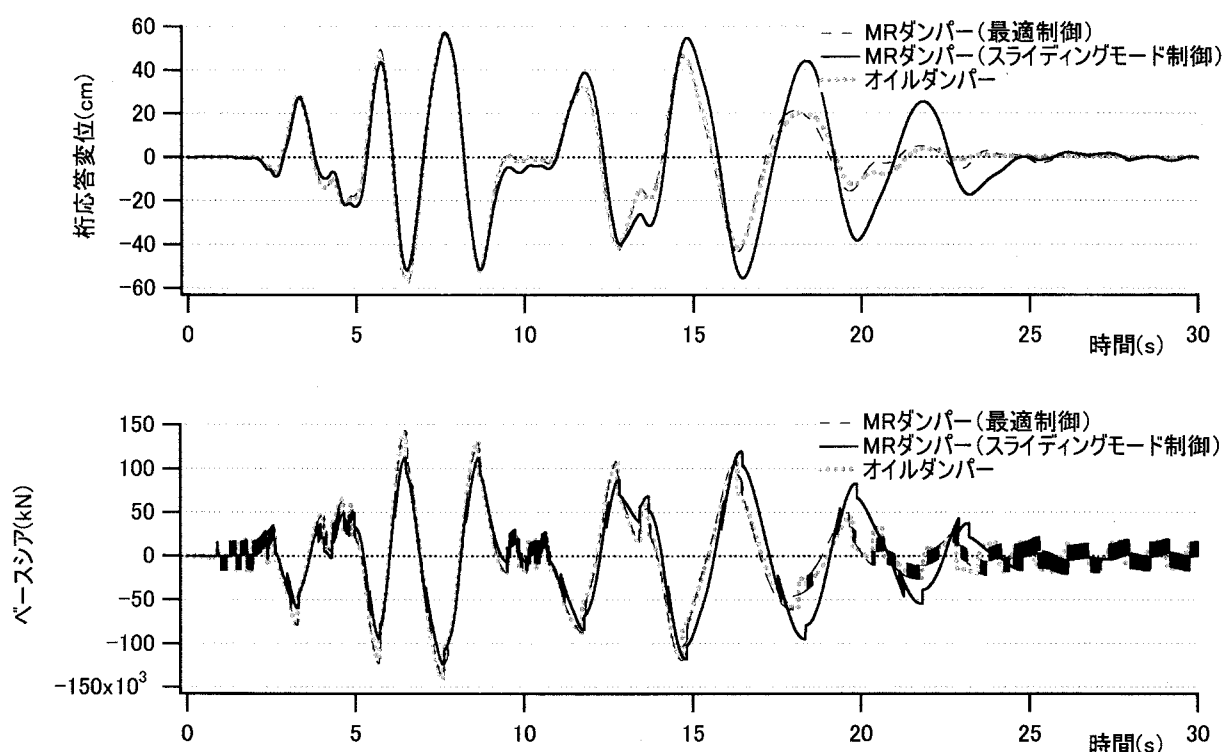


図-6 時刻歴応答の例（J R 鷹取波）

ベースシアについては、オイルダンパーと最適制御のMRダンパーの場合で、ほぼ同じ時刻歴となっており、SMCのMRダンパーの場合は、他の2つより最大応答が低減された時刻歴となっている。

MRダンパーの場合のベースシアの時刻歴において、ベースシアが小さい場合に激しく振動しているが、これは、MRダンパーのモデルがビンガムモデルのため速度応答が0に近い場合は制御力が急激に変化することによる。速度応答が0に近いところで滑らかな制御力が設定されるBouc-Wenモデルを用いることで、このような振動が解消されることは別途確かめている。

(3) 最大応答値とRMS応答値

表-2と表-3に、各入力地震波、各ダンパーの場合の主桁の変位・速度・加速度、ダンパー力、ベースシアの最大応答値とRMS応答値をそれぞれまとめた。あわせて、オイルダンパーの場合のベースシアを1としたときのベースシアの比を示した。

主桁変位は、最大応答については、オイルダンパーとSMCのMRダンパーの場合でほぼ同じであり、最適制御のMRダンパーの場合はこれらより1~2cm大きく（集集波のときは3者とも同じ）、RMS応答については、オイルダンパーと最適制御のMRダンパーの場合でほぼ同じであり、SMCのMRダンパーの場合はこれらとほぼ同じか1~3cm大きい。

主桁速度は、最大応答については、集集波のとき3者とも同じであるが、その他の入力波のときは、最適制御のMRダンパーの場合はオイルダンパーの場合とほぼ同じか2~10%大きく、SMCのMRダンパーの場合はオイルダンパーの場合より3~7%小さい。

主桁絶対加速度は、あとに説明するベースシアと同じ比率になるため割愛する（表-2,3では相対加速度を表示）。

最大ダンパー力については、最適制御のMRダンパーはオイルダンパーに比べて同じか3~5%小さく、SMCのMRダンパーはさらに若干小さい。集集波の場合の最大ダンパー力は、設計総最大ダンパー力20000kNを200~300kN越えており、この程度の強震を受けるときはダンパー力不足の可能性がある。

最大ベースシアは、最適制御のMRダンパーの場合はオイルダンパーの場合に比べて同じか2~6%増加しているが、SMCのMRダンパーの場合はオイルダンパーの場合に比べて8~21%低減されている。

本橋梁の損傷評価の判定値は、主桁変位については95cm、ベースシアについては220000kNであり、一応、変位、ベースシアの最大応答とも、判定値の9割以内に収まっているが、本論の解析は遊動円木モードのみを取り出して行っており、実橋梁においては、J R 鷹取波や集集波程度の強い入力波となると判定値を越える可能性がある。

表-2 最大応答値のまとめ

地震名	ダンパー形式と制御則	桁の最大応答			最大 ダンパー力 (kN)	最大 ベースシア (kN)	最大 ベースシア の比
		変位 (cm)	速度 (cm/s)	加速度 (cm/s ²)			
エルセントロ NS	オイルダンパー	12.2	48.2	391.6	16800	43300	1.00
	MRダンパー	12.7	46.9	396.5	16000	34000	0.79
	スライディングモード制御						
	MRダンパー LQ最適制御	13.9	53.8	391.9	16100	45900	1.06
神戸海洋 気象台 NS	オイルダンパー	37.0	111.7	1035.3	17900	97000	1.00
	MRダンパー	36.4	104.9	1040.6	17200	79200	0.82
	スライディングモード制御						
	MRダンパー LQ最適制御	38.7	108.5	1069.1	17300	99700	1.03
JR鷹取 NS	オイルダンパー	57.1	209.0	906.6	19500	140000	1.00
	MRダンパー	57.1	194.4	900.9	19100	124000	0.89
	スライディングモード制御						
	MRダンパー LQ最適制御	58.7	215.0	933.1	19500	143000	1.02
集集 TCU084 EW	オイルダンパー	83.4	250.4	1350.0	20200	197000	1.00
	MRダンパー	83.7	250.6	1315.6	20300	181000	0.92
	スライディングモード制御						
	MRダンパー LQ最適制御	83.6	249.5	1353.4	20300	197000	1.00

表-3 RMS 応答値のまとめ

地震名	ダンパー形式と制御則	桁のRMS応答			RMS ダンパー力 (kN)	RMS ベースシア (kN)	RMS ベースシア の比
		変位 (cm)	速度 (cm/s)	加速度 (cm/s ²)			
エルセントロ NS	オイルダンパー	2.44	7.47	60.71	12900	14100	1.00
	MRダンパー	2.69	8.04	64.49	9660	10400	0.74
	スライディングモード制御						
	MRダンパー LQ最適制御	2.86	8.95	66.22	9760	12500	0.89
神戸海洋 気象台 NS	オイルダンパー	6.16	23.48	172.27	12800	19700	1.00
	MRダンパー	7.26	23.86	172.00	10000	16700	0.85
	スライディングモード制御						
	MRダンパー LQ最適制御	6.52	24.20	174.59	10500	19200	0.97
JR鷹取 NS	オイルダンパー	16.67	46.09	179.93	13700	38600	1.00
	MRダンパー	20.21	49.81	181.01	11200	40600	1.05
	スライディングモード制御						
	MRダンパー LQ最適制御	16.97	47.21	183.19	12200	40000	1.04
集集 TCU084 EW	オイルダンパー	14.35	44.69	218.83	14500	35100	1.00
	MRダンパー	15.25	45.03	217.94	11100	32000	0.91
	スライディングモード制御						
	MRダンパー LQ最適制御	14.33	45.07	221.10	12100	35000	1.00

7. まとめ

強震動を受ける長大斜張橋にMRダンパーを適用した場合の効果を検討するため、遊動円木モードの1自由度系を用いた解析を行った。MRダンパーの制御には最適制御理論およびスライディングモード制御理論を用いた。結果を以下に要約する。

- 1) 主桁の最大応答変位は、オイルダンパーとスライディングモード制御のMRダンパーの場合ではほぼ同じであり、最適制御のMRダンパーの場合はこれらより1~2cm大きく、現検討段階で、オイルダンパーとMRダンパーの場合で最大応答変位は同程度である。
- 2) 最大ベースシアは、最適制御のMRダンパーの場合はオイルダンパーの場合に比べて同じか2~6%増加しているが、スライディングモード制御のMRダンパーの場合はオイルダンパーの場合に比べて8~21%低減されている。これはスライディングモード制御により最大絶対加速度が抑えられていることによる。ベースシアが低減されることは主塔の設計において有利であると考えられる。
- 3) 集集波程度の強い入力波となると、ダンパー力が設計総最大ダンパー力を越え、ダンパー力不足の可能性がある。ダンパー力容量の見直し、または設計最大ダンパー力を超えた場合の対処方法を検討する必要がある。

以上は本論で用いた条件下の結果であり、今後、スペクトル特性の異なる強震動、また、異なる制御則とくに現代制御ではなく簡易な制御則、さらに、1自由度系ではなく全体系モデルを用いた検討、またさらに、MRダンパーと他のパッシブ型ダンパーとの併用の検討等が課題と考えている。

8. 謝辞： 東京工業大学大学院川島一彦教授には、解析を進める上で助言および励ましをいただきました。ここに記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 川島：リオンアンティリオン橋の耐震設計，橋梁と基礎，pp.33-36, 2001.3.
- 2) Dyke, S.J., Spencer, B.F., Sain, M.K. and Carlson, J.D.: Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction, *Smart Materials and Structures*, 5, pp. 565-575, 1996.
- 3) 岩田：MRダンパー用簡易アクティブ制御手法に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第559号，pp.71-78, 2002.9.
- 4) 樋渡，塩崎，藤谷，曾田：最適レギュレータ理論を用いたMRダンパーによるセミアクティブ免震，日本建築学会構造系論文集，第567号，pp.47-54, 2003.5.
- 5) S. J. Dyke, J. M. Caicedo, G. Turan, L. A. Bergman, and S. Hague: Phase I Benchmark Control Problem for Seismic Response of Cable-Stayed Bridges, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 129, No. 7, pp.857-872, 2003.7.
- 6) A. Ruangrassamee and K. Kawashima : Seismic Response Control of a Benchmark Cable-Stayed Bridge by Variable Dampers, *Proceedings of the American Control Conference Anchorage, AK*, pp. 3064-3069, 2002.5.
- 7) S. J. Moon, L. A. Bergman and P. G. Voulgaris: Sliding Mode Control of Cable-Stayed Bridge Subjected to Seismic Excitation, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 129, No. 1, pp.71-78, 2003.1.
- 8) 袖山，砂子田，藤谷，樋渡，塩崎，外村：高知能建築構造システムの開発に関する日米共同構造実験研究（その81 実免震建物用MRダンパーの基本特性），日本建築学会大会学術講演梗概集，番号21455, 2003.9.
- 9) Wen, Y.K., "Method of Random Vibration of Hysteretic Systems." *J. of Engrg. Mech. Div., ASCE*, Vol. 102, No. EM2, pp. 249-263, 1976.
- 10) 野波健蔵，西村秀和，平田光男：MATLABによる制御系設計，東京電機大学出版局，1998.