

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560224
 研究課題名（和文） 受動・準能動の双方に適応可能なダンパを備えた制振システムの研究
 研究課題名（英文） Vibration Control System Using Dampers Applicable to Twin Mode of Semi-Active and Passive Types
 研究代表者
 砂子田 勝昭（SUNAKODA KATSUAKI）
 秋田大学・工学資源学部・教授
 研究者番号：50375218

研究成果の概要：地震時に建物の揺れを抑制させる目的で、ボールねじと発電機を用いた振動抑制装置を開発し、その動的特性および地震時の制振性能を実験と解析により実証した。主な成果は、①受動・準能動の双方に利用可能な回転慣性質量をもつ30kN用の電磁抵抗型制振装置を開発、②ボールねじおよび歯車を用いることによって慣性トルクが拡大されるため大きな慣性効果を得られ、③全高9m、全重量18tの三層構造物に本装置を取付けて地震波加振実験を行い、本装置の受動・準能動における制振効果とその実用性を確かめたことである。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：振動制御

1. 研究開始当初の背景

地震から建築構造物、橋梁、産業構造物などを守ることは、緊急かつ重要な課題であり、国内外で地震から建築土木構造物を守るために多くの研究が行われてきた。これまでの建築構造物に対する地震対策として、中、低層ビルに対しては積層ゴムに代表される基礎免震方法、高層、超高層ビルに対してはオイルダンパや粘弾性材料による高減衰装置を用いた受動（パッシブ）型制振方法が多用されている。すなわち現在の地震対策としてのダンパは免震、制振を問わず、パッシブ型ダンパが主流である。可動質量を屋上などに

設置した能動（アクティブ）型制振方法は、超高層ビルの風対策や居住性の向上などに用いられているが、大規模地震対策としては用いられないものと思われる。一方、準能動（セミアクティブ）型制振方法は、早くからその利点である、大きなエネルギー源が不要であること、ロバスト安定性が高いこと、振動低減効果が大きいことなどが主張され、また研究レベルにおいて、多くの論文が発表されてきた。地震対策のための準能動型制振方法に用いられるダンパには、磁気粘性流体を用いたMRダンパや可変オリフィスを用いたオイルダンパなどがある。これらのダンパ

を用いた準能動型制振方法が研究され、実物の建築物に設置されたことがある。しかしその後の進展が見られず、実施例がきわめて少ない。その原因として、①コスト、信頼性の両面で実用に耐えられる準能動型ダンパが少ないことと、②制御理論と制御装置の両面について、信頼性と確実性に乏しいことなどが挙げられる。

研究代表者は、原子力発電所内の機器や配管等の耐震手段としてメカニカルスナッパを開発しており、既に使用実績としては約35年が経過している。メカニカルスナッパはボールねじの直線一回転運動を利用し、回転体の慣性質量を増大させた構造となっている。また、ボールねじの直線一回転運動を利用し、発電によって振動エネルギーを消散させる装置にメカトロダンパの開発に携わり、その有効性を明らかにした。しかしメカトロダンパにおいては、大きな容量（例えばダンパの反力レベルで100kN以上）のダンパを作ることが出来ず、適用性に問題を残す結果となった。

2. 研究の目的

本課題では、地震に対する対策のうち、受動型、準能動型の双方に適用可能なダンパを用いた制振システムを確立することを目的とする。上述の欠点を補うべく、かつてのメカトロダンパに回転慣性質量を新たに付加することにより、容量が実用規模まで大きくなり、かつ減衰力がコントロール可能な大きな制振効果を備えた準能動型ダンパが得られるものである。

それは、低周波数（長周期振動）で振動抑制効果を発揮することを目的としたボールねじを用いた電磁抵抗型ダンパである。本装置はメカトロダンパとメカニカルスナッパの両方の特性、すなわち減衰機構と慣性質量を併せ持ち、発電機両端子間の電気抵抗を操作することによってセミアクティブダンパおよびパッシブダンパの双方の機能をもつ。MR流体や磁気ダンパなどに比べ、外部からのエネルギーを少なくできるため、信頼性、安全性に優れ、低コストという特長がある。

本研究では、比較的大きな構造物を対象にした、ボールねじを用いた30kN用の電磁抵抗型ダンパを開発し、実大構造物に対する本装置の制振効果を確かめるために、台湾の国家地震工学研究センター（National Center for Research on Earthquake Engineering : NCREE）において、性能試験および三層構造物を用いた振動実験を行った。振動実験では、発電機の端子間に可変負荷抵抗装置を取付けて、リヤプノフ関数を規範とした二値切替型のセミアクティブ制御手法を用いて、各層における絶対加速度および相対変位の低減を試みた。また、実験結果を計算結果と比較検討し、

本装置の制振効果を確かめた。

なお、本研究で提案するこのダンパは受動型、準能動型ダンパの双方に適用が可能であり、建屋層間の相対変位を利用して回転慣性質量と発電機を用いて振動エネルギーを電気に変え、その電力消費をコントロールさせる研究は、ほとんど例が無いものと考えられる。この方法の特徴は、①学問的な研究がほとんど行われていないこと、②振動減衰の理論が明確であり制御理論が確立しやすいこと、③準能動型ダンパの構造が比較的単純でありコストが安価であること、④地震による水平動への対策のみならず上下動にも容易に応用展開が可能であることである。このために将来的に本システムは、高層建築物の他に、戸建住宅や産業機器への適用の可能性がある。最終的には、実用に耐えられるシステム全体を確立することを目標とする。

3. 研究の方法

(1) 開発・製作

30kN用電磁抵抗型ダンパの外観を図1に、その諸元を表1に示す。本装置は、シリンダ、ピストン、ロッドエンド、ボールねじ、ボールナット、フライホイール、カップリング、増速ギア、および発電機から構成される。ロッドエンド間に生じた直線運動は、ボールねじによって回転運動に変換され、増速ギアを介して発電機を駆動させる。発電機は内部コイルの印加電流の大きさによって回転速度を制御できるので、その逆にコイルの電流すなわち発電機の両端子間の負荷抵抗が熱エネルギーを消散することによって回転速度に比例した減衰力を発生させることができる。発電機の端子間には、負荷抵抗の値を任意に変化させるための可変負荷抵抗装置を介することで、減衰力を制御することが可能となる。

発電機は120W用をType Iとし図1(a)に、40W用をType IIとし図1(b)に示す。なお、Type IIは減衰力を補うために増速ギアが取り付けられていることに加え、ボールねじ軸端に取付けられたフライホイールは、二種類の慣性質量に交換することが可能で、慣性質量が小さい場合は図1(b)の実線のように、また破線で示されるように付加することで大きな慣性力が得られる。

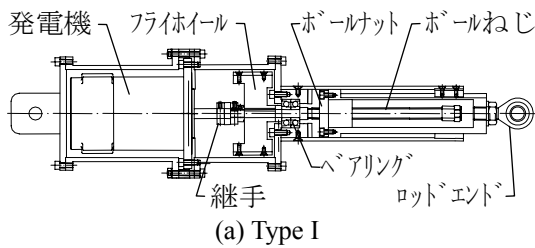
本装置の抵抗力は次式で与えられることがわかっている。

$$F = \frac{1}{\eta} \left(\frac{2\pi}{L} \right)^2 \left[(I_1 + \alpha^2 I_2) \frac{d^2 x}{dt^2} + \alpha^2 \frac{K_E K_T}{R + R_a} \frac{dx}{dt} \right] + f_0 \text{SIGN} \left(\frac{dx}{dt} \right) \quad \dots (1)$$

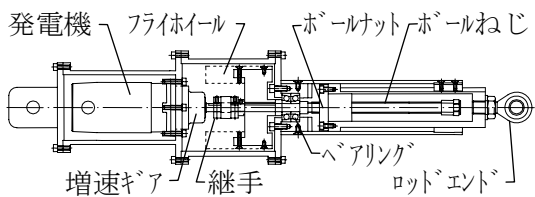
ここで、 x は両ロッドエンド間の並進変位、 α はギアの増速比、 η はボールねじの逆作動変換効率、 L はボールねじのリードである。式

(1)の第一項は回転トルクによる慣性力項であり、 I_1 はフライホイールおよびボールねじ軸の回転慣性モーメント、 I_2 は発電機軸の回転慣性モーメントである。第二項は発電機の電磁抵抗による減衰力項であり、 K_E 、 K_T は発電機の起電力定数、トルク定数、 R 、 R_a は端子間の負荷抵抗、電機子内部抵抗である。この他、シリンダとピストン間およびベアリング等による摩擦を考慮し、第三項の f_0 は摩擦力を、SIGNは符号関数を表す。

式(1)から、発電機の端子間における負荷抵抗の大きさを変えることにより、発電機に流れる電流を制御でき、減衰係数を変化させることが可能となる。すなわち、負荷抵抗 $R=0$ （短絡）の場合には減衰係数が最大となり、負荷抵抗 $R=\infty$ （開放）の場合にはほぼ零の最小値をとる。ここで、加速度項および速度項をそれぞれ等価慣性質量 m_e 、減衰係数 c_d と定義する。



(a) Type I



(b) Type II

図1 ダンパ構造図

表1 ダンパ諸元

		Type I	Type II
全長		704 mm	699 mm
重量		18.8 kg	16.8 kg
ストローク		±60 mm	±60 mm
リフト	L	5 mm	5 mm
ねじ径		14 mm	14 mm
回転効率	η	0.94	0.94
フライホイール		2.40 kg	1.96 kg (S) 3.96 kg (L)
慣性モーメント	I_1	$35.9 \times 10^{-4} \text{kgm}^2$	$24.9 \times 10^{-4} \text{kgm}^2$ $36.4 \times 10^{-4} \text{kgm}^2$
ギア比	α	1	5
発電電力		120 W	40 W
トルク定数	K_T	0.076 Nm/A	0.074 Nm/A
起電力定数	K_E	0.076 Vs/rad	0.074 Vs/rad
モータ抵抗	R_a	0.5 Ω	2.0 Ω
慣性モーメント	I_2	$2.50 \times 10^{-4} \text{kgm}^2$	$0.53 \times 10^{-4} \text{kgm}^2$

(2) 性能試験

装置単体の抵抗力特性を調べるために、性能試験を行った。試験は一端を固定壁に他端を油圧アクチュエータに取付けて、周波数0.3~1.0 Hzの正弦波状変位を与えた場合の荷重と変位を測定した。発電機端子間の負荷抵抗を四種類(∞ , 24.0, 15.2, 10.8 Ω)に、およびフライホイールの慣性質量を二種類(6000, 12000 kg)に変えて行った。

図2の実線に慣性質量が6000 kgの場合における負荷抵抗を変化させた実験結果を、図3の実線に慣性質量を12000 kgにした場合の実験結果を、それぞれ破線で示される計算値と併せて示す。図2から、左肩上がりで示される慣性力およびだ円形で示される減衰力の和で表されることがわかる。また、発電機端子間の負荷抵抗が少なくなるにつれて減衰係数が増加し、それぞれ0, 9000, 13600, 18400 Ns/mとなった。理論的に短絡時では115 kNs/m程度となるが、ここでは行われていない。図3から、左肩上がりの勾配が図2に比べて増しており、慣性質量の効果が分かる。なお、実験結果から摩擦力は100 N程度であった。また、全ての場合で加振周波数が高くなるにつれて高周波のノイズが見られるが、これはねじ軸とボールの弾性変形による影響と考えられる。

(3) 振動実験

地震時における本装置の制振効果を確かめるために、地震応答実験を行った。実験で用いた三層構造物の外観を図4に、その諸元を表2に示す。本施設は台湾のNCREEにある振動台である。構造物は高さ9 m、長軸方向長さ3 m、奥行2 mで、階層重量6 t、総重量18 tで、長軸方向に加振される。各層には重量調整のための重錘が設置されている。制振装置は慣性力の関係上Type IIのみ使用し、ブレースを介して基礎と一階、および一階と二階の層間にそれぞれ一台ずつ取付けた。なお表2中のばね定数および減衰係数はランダム加振時の応答波形から同定した値である。

三層構造物を三質点モデルに置き換えた振動モデルを図5に示す。基礎部に入力変位 x_0 が作用したときの運動方程式は

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{b_2\}\ddot{x}_0 + \{b_1\}\dot{x}_0 + \{b_0\}x_0 \quad (2)$$

となり、それぞれ

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 + m_e & 0 & 0 \\ 0 & m_2 + m_e & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 + c_{d1} + c_{d2} & -c_2 - c_{d2} & 0 \\ -c_2 - c_{d2} & c_2 + c_{d2} + c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix}$$

$$\{b_2\} = \{m_e \ 0 \ 0\}^T, \quad \{b_1\} = \{c_1 + c_{d1} \ 0 \ 0\}^T$$

$$\{b_0\} = \{k_1 \ 0 \ 0\}^T, \quad \{x\} = \{x_1 \ x_2 \ x_3\}^T \quad (3)$$

で表される．ここで $[M]$, $[K]$, $[C]$ はそれぞれ質量，剛性，減衰マトリクス， x_i , m_i , k_i , c_i ($i = 1, 2, 3$) は i 階の絶対変位，質量，ばね定数，内部減衰であり， c_{di} ($i = 1, 2$) は i 階に取付けた制振装置の減衰係数である．質量比を $\varepsilon_i (=m_e/m_i)$ ，減衰比を $\zeta_i (= (c_i + c_{di}) / (2m_i k_i)^{1/2})$ と定義する．

一方，リヤプノフ関数は以下のように定義される．

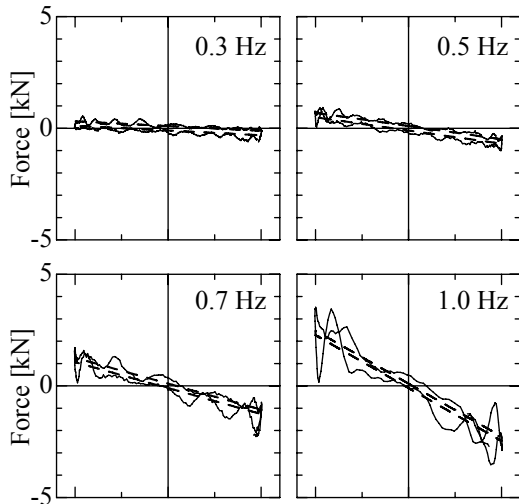
$$V(t) = \beta \{\dot{x}\}^T [M] \{\dot{x}\} + (1 - \beta) \{x\}^T [K] \{x\} \quad (4)$$

ここで， β ($0 \leq \beta \leq 1$) は運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの相互の重みの役割である．ちなみに， $\beta = 0.5$ とした場合，単純な運動およびポテンシャルエネルギーの総和になる．エネルギー消散速度は式(4)を時間微分することで得られ

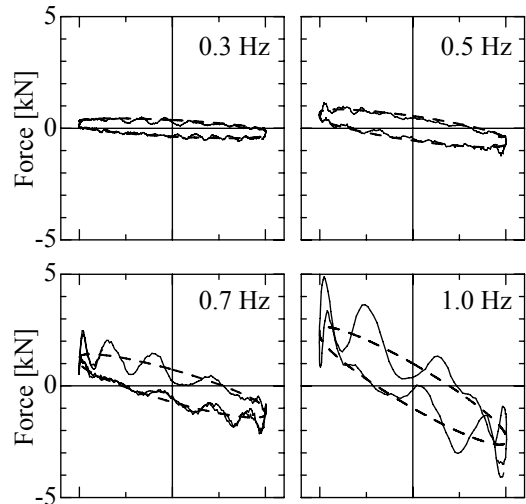
$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \beta \{\dot{x}\}^T [M] \{\ddot{x}\} + (1 - \beta) \{x\}^T [K] \{\dot{x}\} \\ &= -\beta \{\dot{x}\}^T [C] \{\dot{x}\} + (1 - 2\beta) \{x\}^T [K] \{\dot{x}\} \\ &\quad + \beta \{x\}^T \{b_2\} \ddot{x}_0 + \beta \{x\}^T \{b_1\} \dot{x}_0 + \beta \{x\}^T \{b_0\} x_0 \end{aligned} \quad (5)$$

となる．右辺第一項および四項は c_{di} を含む時変項で，それ以外は受動要素なので，エネルギー消散速度を最大，すなわち式(5)を最小にするためには，時変項であるを最小にすれば良いことがわかる．式(3), (6)から

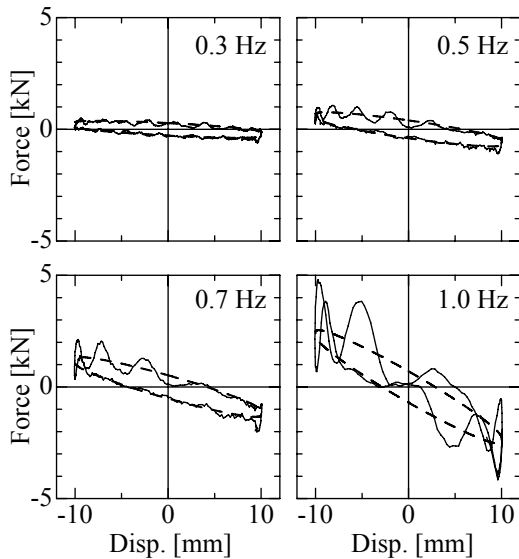
$$\begin{aligned} \dot{V}_0(t) &= -\beta \{c_{d1} \dot{x}_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_0) + c_1 \dot{x}_1 (\dot{x}_1 - \dot{x}_0) \\ &\quad + (c_2 + c_{d2}) (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2 + c_3 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3)^2\} \quad (7) \end{aligned}$$



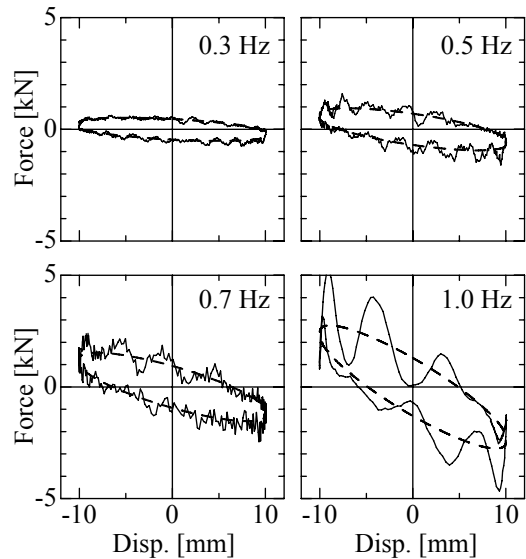
(a) $c_d = 0$ Ns/m, $R = \infty$



(c) $c_d = 13600$ Ns/m, $R = 15.2 \ \Omega$



(b) $c_d = 9000$ Ns/m, $R = 24.0 \ \Omega$



(d) $c_d = 18400$ Ns/m, $R = 10.8 \ \Omega$

図2 抵抗力特性 ($m_e = 6000$ kg)

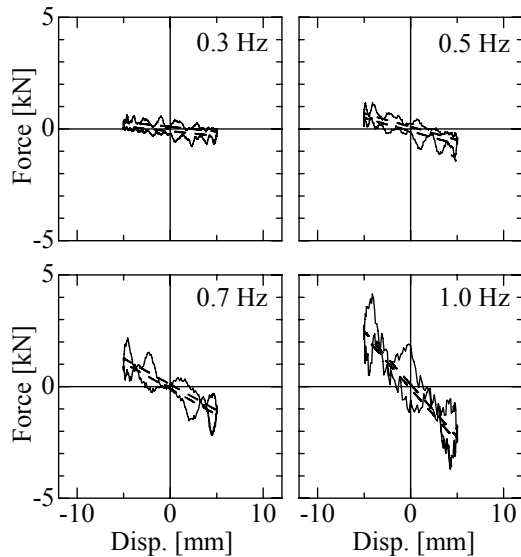


図3 抵抗力特性 $c_d = 0$ Ns/m, $R = \infty$ ($m_e = 12000$ kg)

$$\dot{V}_v(t) = -\beta \{\dot{x}\}^T ([C]\{\dot{x}\} - \{b\}\dot{x}_0) \quad (6)$$

となる。時変項は第一項と三項であるが、第三項は相対速度の二乗が常に正になるため、二階に取付けたダンパの減衰係数 c_{d2} は常に最大値が好ましい。第一項は、絶対速度および相対速度の積が、減衰力を発生できる向きであれば減衰係数を最大にし、それ以外では最小すなわち零が好ましい。したがって、一階に取付けた制振装置の減衰係数は以下の二値切替 (Bang-Bang) 型となり以下の式で与えられる。

$$c_{d1} = \begin{cases} c_d & \dot{x}_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) > 0 \\ 0 & \dot{x}_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

この減衰係数を制御するために、発電機の両端子間に取付ける可変負荷抵抗装置として、電流コントローラを開発した。コントローラはDSPからの外部電圧に比例して発電機外部端子間の電流値を制御することができ、これにより見かけの抵抗値を変化させることができる。本実験では、二値切替制御であるため、外部電圧 0 V 時において開放、10 V 時において短絡となるように設定した。

実験に用いた地震波はインペリアルバレー地震 (1940) エルセントロ南北成分波形を最大加速度 0.5 m/s^2 に基準化したものである。実験は、質量比を二種類および減衰比を最大値 ($\zeta_i = 0.1$) に固定した場合 (パッシブ)、および最大値との二値切替制御をした場合 (セミアクティブ) における各層の絶対加速度と絶対変位を測定した。なお、サンプリングは 200 Hz である。ただし、水平面内のねじれが生じることが予想されるため、各層長軸方向に二つの測定機器を取付けて、計算値と差異が少ない方を選んだ。

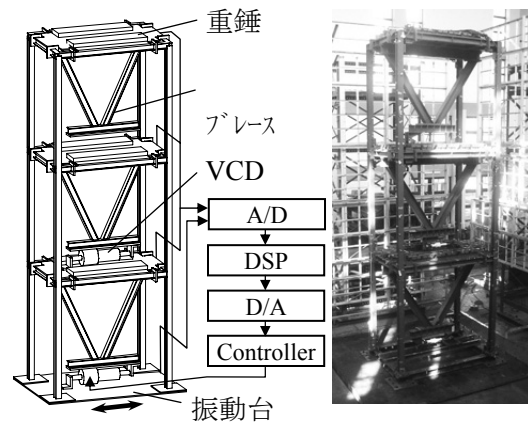


図4 実験装置

表2 同定パラメータ

全高		9 m
全幅		3 m
奥行き		2 m
各層重量	m_i	6,000 kg
固有周波数		1.53 Hz
ばね定数	k_1	1.6609×10^6 N/m
	k_2	1.9152×10^6 N/m
	k_3	1.5694×10^6 N/m
減衰係数	c_1	8.7314×10^2 Ns/m
	c_2	3.6620×10^3 Ns/m
	c_3	5.4533×10^3 Ns/m

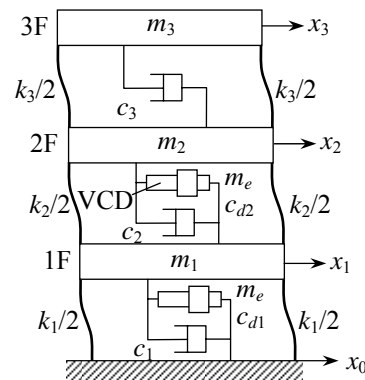


図5 解析モデル

地震応答実験結果の最大値を解析結果と併せて表3に示す。これらの結果から、制振装置を取付けない場合に比べて、絶対加速度はパッシブ時で $1/3 \sim 1/4$ 程度、相対変位で $1/3 \sim 1/2$ 程度に低減していることがわかる。慣性質量を増やした場合、相対変位が減少していることから、振動抑制効果が上がっているといえる。また、パッシブよりもセミアクティブの方が少し悪化している場合もあるが、これは発電機や電流コントローラの追従性等が影響したと考えられる。また、制振装置がない場合の実験結果波形と計算結果波形に多少違いは、水平面内のねじれ等の影響と

表3 地震応答結果

	F	Acc.		Disp.	
		Exp.	Cal.	Exp.	Cal.
非装着	1	1.24	0.54	10.8	8.15
	2	1.04	0.77	9.65	5.82
	3	1.26	1.10	6.33	4.29
装着(受動) $\varepsilon_1=1, \zeta_1=0.1$ $\varepsilon_2=0, \zeta_2=0$	1	0.39	0.29	6.14	5.70
	2	0.49	0.43	5.37	3.12
	3	0.60	0.55	3.16	2.15
装着(制御) $\varepsilon_1=1, \zeta_1=C$ $\varepsilon_2=0, \zeta_2=0$	1	0.45	0.30	7.10	5.69
	2	0.54	0.44	5.27	3.20
	3	0.57	0.58	3.23	2.21
装着(受動) $\varepsilon_1=2, \zeta_1=0.1$ $\varepsilon_2=0, \zeta_2=0$	1	0.39	0.35	6.24	5.99
	2	0.51	0.41	4.33	2.54
	3	0.54	0.46	3.04	1.77
装着(制御) $\varepsilon_1=2, \zeta_1=C$ $\varepsilon_2=0, \zeta_2=0$	1	0.39	0.35	6.72	5.98
	2	0.48	0.40	4.39	2.58
	3	0.55	0.48	3.01	1.82
装着(受動) $\varepsilon_1=\varepsilon_2=1$ $\zeta_1=\zeta_2=0.1$	1	0.25	0.25	4.34	3.97
	2	0.35	0.32	3.90	2.45
	3	0.41	0.32	2.12	1.23
装着(制御) $\varepsilon_1=\varepsilon_2=1$ $\zeta_1=C, \zeta_2=0.1$	1	0.29	0.27	5.09	4.89
	2	0.42	0.39	3.99	3.13
	3	0.44	0.47	2.38	1.78
装着(受動) $\varepsilon_1=\varepsilon_2=2$ $\zeta_1=\zeta_2=0.1$	1	0.29	0.30	3.90	5.06
	2	0.41	0.39	3.45	3.13
	3	0.40	0.44	2.31	1.68
装着(制御) $\varepsilon_1=\varepsilon_2=2$ $\zeta_1=C, \zeta_2=0.1$	1	0.26	0.30	3.31	5.08
	2	0.40	0.39	3.28	3.14
	3	0.40	0.44	2.27	1.69

Acc.; m/s^2 , Disp.; mm

考えられ、制振装置取付時ではほとんど一致していることがわかる。

4. 研究成果

実大構造物用の電磁抵抗型ダンパを開発し、その抵抗力特性および大規模実験モデルによる地震応答実験を行い、その振動抑制効果を検証した。主な結果は以下の通りである。

- ① 受動・準能動の双方に利用可能な回転慣性質量をもつ30 kN用のダンパを開発した。
- ② ボールねじおよび増速ギアを用いることで階層重量の数倍程度の慣性質量をもつことができる。また、慣性質量が増すと相対変位の制振効果が向上する。
- ③ 三層構造物を用いた地震応答の結果、本装置の振動抑制効果、および解析の有効性が確かめられた。
- ④ 本システムは、高層建築物の他に、戸建住宅や産業機器への適用の可能性があり、実用に耐えられるシステム全体を確立することができる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 松岡太一, 砂子田勝昭, 平元和彦, 大竹隆文, 発電式振動抑制装置に関する研究, 日本機械学会論文集C編, 73巻735号, pp. 2926-2931, 2007, 査読有。
- ② 平元和彦, 松岡太一, 砂子田勝昭, 消散システム理論に基づく二値切替型セミアクティブ制御系の設計, 日本建築学会構造系論文集, 第621号, pp. 33-39, 2007, 査読有。

[学会発表] (計5件)

- ① Hiramoto, K., Matsuoka, T., Sunakoda, K., Fukukita, A. and Yamazaki, I., Semi-active Control of Civil Structures with a One-step-ahead Prediction of the Seismic Response, ASME PVP2009, No. 77637, 2009. 7. 28, Czech.
- ② Matsuoka, T., Sunakoda, K., Hiramoto, K., Yamazaki, I., Fukukita, A., P. N. Roschke, Chin-Hsiung Loh, Pei-Yang Lin, Seismic Performance of Vibration Control Device that Generates Power, ASME PVP2009, No. 77695, 2009. 7. 28, Czech.
- ③ 松岡太一, 砂子田勝昭, 平元和彦, ほか7名, 回転慣性質量を持つ電磁抵抗可変型ダンパーによる応答制御, 日本建築学会大会学術講演発表会, No. 21310~21313, 2008. 9. 20, 広島。
- ④ Matsuoka, T., Sunakoda, K., Hiramoto, K., Roschke, P. N., Vibration Tests of a Three Story Benchmark Structure with Vibration Control Devices Using Power Generator, ASCE Structure Congress 2008, No. 351, 2008. 4. 26, Canada.
- ⑤ 砂子田勝昭, 松岡太一, 平元和彦, 構造物を対象とした発電式振動抑制装置の開発と特性調査, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2007, No. 447, 2007. 9. 28, 広島。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

砂子田 勝昭 (SUNAKODA KASTUAKI)
秋田大学・工学資源学部・教授
研究者番号：50375218

(2) 研究分担者

- ① 平元 和彦 (HIRAMOTO KAZUHIKO)
秋田大学・工学資源学部・准教授
研究者番号：00261652
- ② 松岡 太一 (MATSUOKA TAICHI)
秋田大学・工学資源学部・助教
研究者番号：80360189