

免震用粘性ダンパーの開発

佐々木康人 馮 徳 民
増田圭司 佐々木 聡
中村佳也^{*1} 田中 清^{*1}

概 要

免震構造では、一般的に、粘性系ダンパーは履歴系ダンパーより加速度応答の低減や低レベル入力での応答低減などの面で効果が高いとされている。そこで、免震構造の適用範囲の拡大を目的として、機構が簡明な粘性ダンパーの開発を行った。本報では、粘性ダンパーの概要と動的加力試験の結果について示す。また、粘性系ダンパーと履歴系ダンパーの免震効果の違いについて検討した結果についても報告する。

ダンパーは粘性体(シリコンオイル)を用いたシリンダ型のダンパーで、減衰力は速度の α 乗に比例して発生する。ダンパーの仕様は2種類で、 α を0.3とし、減衰力の最大値を450kNと900kNとしている。各種動的加力試験を通じて減衰力と速度の関係が設定した特性式と対応すること、温度および繰り返し加振の影響が小さいことを確認した。

粘性系ダンパーと履歴系ダンパーの免震効果の違いについては、仮想免震建物モデルを対象として、鉛ダンパーと粘性ダンパーの比率を解析変数とした地震応答解析により検討した。結果として、粘性ダンパーの比率が大きくなると、上部構造の最大加速度が小さくなり、低レベル入力に対する免震効果も大きくなることを確認した。

Development of Viscous Damper for Seismically Isolated Structure

Abstract

It is well known that viscous dampers have higher performance in reducing acceleration response on upper structure and in reducing the response against low level excitation for seismically isolated structure compared to hysteretic dampers. To extend the application areas of seismically isolated structures, a mechanically simple viscous damper has been developed. This paper outlines the viscous damper, the dynamic loading test results of the damper and compares the performance of viscous and hysteretic dampers.

This damper with cylindrical body uses the viscous material. The damping force is proportional to a times velocity. There are two kinds of dampers which have maximum damping forces of 450kN and 900kN and an α of 0.3. From the dynamic loading test results, it was verified that the relationship between damping force and velocity coincides with the adopted design equation. Temperature dependency and the influence of the cyclic loading on the damping performance are small.

The difference in performance between the viscous damper and the hysteretic damper was investigated by comparing seismic response analysis for a base-isolated structure. The main parameter for the analysis is the ratio between the viscous damper and the lead hysteretic damper. Results verified that the acceleration response on the upper structure decreases and isolated performance against low level excitation improves as the ratio of the viscous damper increases.

キーワード: 免震構造, 粘性ダンパー,
動的加力試験、地震応答解析

*1 (株)高環境エンジニアリング 博士(工学)

§1. はじめに

免震構造に用いる減衰部材、いわゆるダンパーは、その特性から大きく「履歴系」、「粘弾性系」、「粘性系」に分類できる。当社でこれまでに開発、実用化した鉛入り積層ゴムの鉛や滑り支承は、「履歴系」ダンパーである。「粘弾性系」は高減衰ゴムなど、「粘性系」にはオイルダンパー、粘性ダンパーなどがあり、「粘性系」は近年、使用されることが多くなってきている。

免震構造では、一般的に、粘性系ダンパーは履歴系ダンパーより加速度応答の低減や低レベル入力での応答低減などの面で効果が高いとされている。そこで、免震構造の適用範囲の拡大を目的として、機構が簡明な粘性ダンパーの開発を行った。

本報では、開発した粘性ダンパーの概要と動的加力試験の結果について示す。また、粘性系ダンパーと履歴系ダンパーの免震効果の違いについて検討した結果についても報告する。

表1 ダンパーの仕様

型式	減衰力(F(kN))-速度(V(m/s)) 関係(特性式)	最大減衰力 (kN)	限界速度 (m/s)	限界変形 (mm)
EAE-500	$F=450V^{0.3}$	450	1.0	±500
EAE-1000	$F=900V^{0.3}$	900	1.0	±500

§2. 粘性ダンパーの概要

開発した粘性ダンパーは粘性体(シリコンオイル)を用いたシリンダ型のダンパーである。断面の模式図を図1に示す。ダンパーはピストンロッド、ピストンヘッド、シリンダおよび粘性体等で構成され、取付ピンを介して免震建物に取り付けられる(図2参照)。ピストンヘッドが粘性体中を移動する際に発生する抵抗を利用して減衰力を発生させる簡明な機構となっている。減衰力は速度に依存し、速度の α 乗(α :定数)に比例して発生する。減衰力と速度の関係は任意に設定可能で、具体的には、ピストンヘッドとシリンダの間隙、ピストンヘッドの幅、粘性体の粘度などを調整することにより設定する。同一の機構で、免震だけでなく、制振も製作できる。

ダンパーの仕様は表1に示す2種類で、減衰力の最大値を450kNと900kNとしている。特性式として設定している減衰力Fと速度Vの関係を図4に示す。 α は0.3に設定しており、限界速度は1.0m/sとなっている。ダンパーの形状および基準寸法を図3に、外観を写真1に示す。

なお、本ダンパーは、(株)高環境エンジニアリングと上海材料研究所が、免震材料として国土交通大臣の認定を取得している(認定番号: MVBR-0330)。

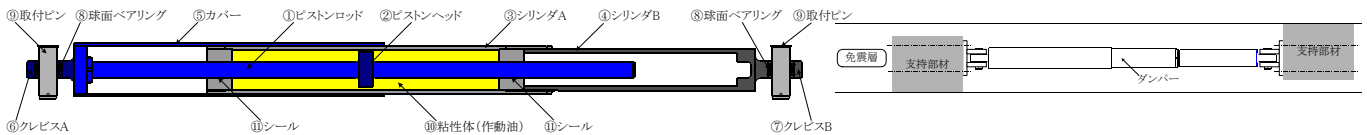


図1 断面の模式図

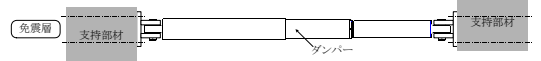
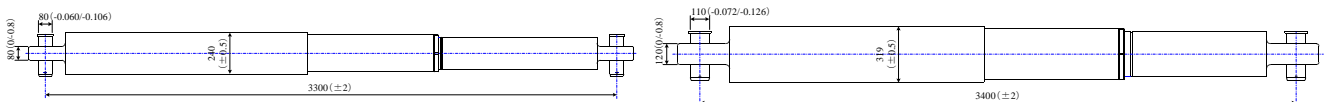


図2 取付状況



(a) EAE-500

(b) EAE-1000

図3 ダンパーの形状および基準寸法

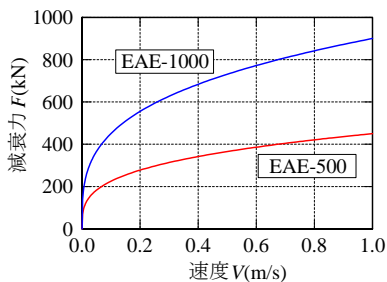


図4 減衰力-速度関係(特性式)



写真1 ダンパー外観(EAE-1000)

§3. 粘性ダンパーの動的加力試験

3.1 基本特性確認試験

振動数および振幅を変化させた加振試験により、基本特性を確認した。試験体数は前述の EAE-500 が 3 体、EAE-1000 が 2 体である。

試験は、上海材料研究所所有の動的加力装置(最大荷重:2000kN, 最大ストローク:±150mm, 最大速度:1.2m/s)を用いて行った。写真 2 に装置の外観を示す。

加力は正弦波加振とした。加振条件と最大速度を表 2 に示す。加振サイクル数は 4 サイクルとした。

測定方法を図 5 に示す。データの符号は、変位は伸び、減衰力は引張力をプラスと定義した。測定のスプリング周波数は 1 サイクルデータ数が 200 となる周波数とした。

結果の評価は 3 サイクル目の加振結果で行った。速度の評価は、全体変位を微分した値を用いた。これは、粘性ダンパーのモデルは弾性ばねと非線形ダッシュポットモデルの直列結合である Maxwell モデル(図 6(b))のほうが精度はよいが、弾性ばねの剛性が相対的に大きいため、非線形ダッシュポットのみモデル(ダッシュポットモデル(図 6(a))として扱うことにしたためである。最大減衰力、速度の評価は正側、負側それぞれ行った。

図 7 に EAE-500, EAE-1000 それぞれの全試験体の最大減衰力-最大速度関係を示す。特性式(図中の実線)との対応はよく、ばらつきは±15%の範囲(破線間の領域)におさまっている。

図 8 には、EAE-500, EAE-1000 それぞれの No.1 試験体の減衰力-変位関係を示す。いずれの加振条件においても、安定した履歴曲線を描いている。図中の破線は Maxwell モデルに仮定したときの弾性ばねの剛性を表したものである。剛性は、型式ごとに、振動数、振幅に依存しない同一の値となっている。

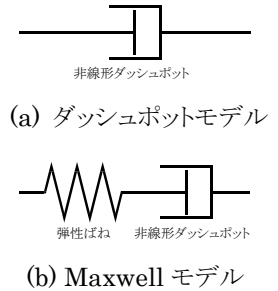


写真 2 動的加力装置

図 6 ダンパーのモデル

表 2 加振条件と最大速度(m/s)

振幅 A (mm)	振動数 f (Hz)			
	0.2	0.5	1.0	1.4
40	0.050	0.126	0.251	—
80	0.101	0.251	0.503	—
120	0.151	0.377	0.754	1.056

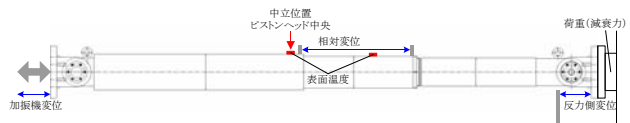
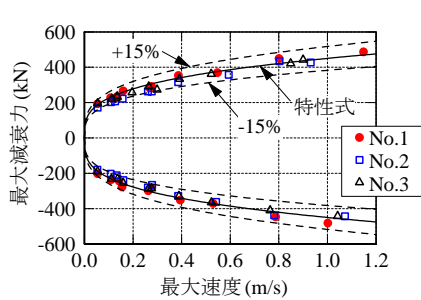
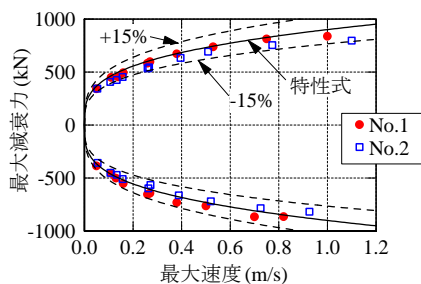


図 5 測定方法

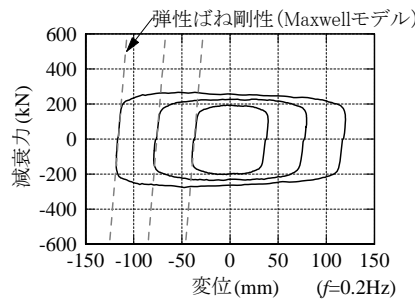


(a) EAE-500

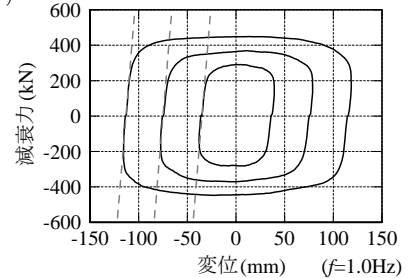


(b) EAE-1000

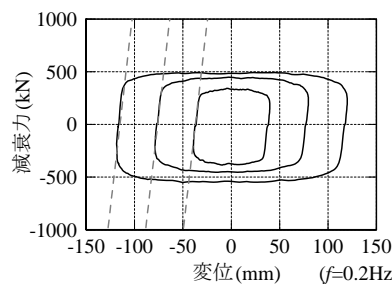
図 7 最大減衰力-最大速度関係



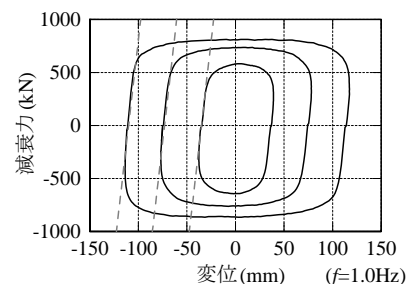
(a) EAE-500



(a) EAE-500



(b) EAE-1000



(b) EAE-1000

図 8 減衰力-変位関係

3.2 特性変化確認試験

3.2.1 温度依存性

ダンパーの温度を変化させて加振試験を行い、温度の影響を確認した。試験体は基本特性試験で用いた EAE-500 (No.2) である。試験装置、測定項目等は基本特性試験と同様である。

温度は-20, 0, 20, 30, 40, 60, 80℃の 7 段階に変化させた。加振は正弦波加振とし、加振条件は振動数 $f=0.5\text{Hz}$ 、振幅 $A=80\text{mm}$ とした。結果の評価は等価粘性減衰係数の変化率によった。温度の制御は、①-20℃以下の冷却装置の中に 24 時間放置、②試験体を試験装置に設置した後、-20℃になった時点で加振を開始、③表面温度が所定の温度まで上昇した時点(高温の場合は、予備加振により所定の温度となるように調整)で次の加振を開始、という手順で行った。

図 9 に等価粘性減衰係数の基準温度 (20℃) に対する比率と加振前表面温度の関係を示す。等価粘性減衰係数 C_{eq} は次式によって求める。

$$C_{eq} = \frac{\Delta W}{\pi \cdot 2\pi f A^2}$$

ΔW : 1 サイクルの吸収エネルギー

高温になると、等価粘性減衰係数はやや大きくなる傾向が見られる。変化率は-2.1%~8.7%程度で温度の影響は小さい。

3.2.2 繰り返し耐久性

繰り返し加振による特性変化について確認した。試験体は EAE-500 (No.2) 1 体である。試験装置、測定方法

は基本特性試験と同様である。加振は正弦波加振とし、加振条件は、想定した免震建物の長周期地震動および強風に対する応答を参考に表 3 のように設定した。図 10 に 1 サイクル最大減衰力とサイクル数の関係を示す。1 サイクルの最大荷重の変化率は、加振条件①では正側-4.5%、負側-4.7%、②では正側+3.1%、負側+7.3%であり、繰り返し加振による影響は小さいことがわかる。

3.3 ダンパーの解析モデル

ダンパーの解析モデルを図 6 に示すダッシュポットモデルとした場合と Maxwell モデルとした場合の解析結果と試験結果との比較を行った。解析には、(社)日本免震構造協会の HP に公開されている解析プログラムを用いた。なお、Maxwell モデルでは、ダッシュポットの減衰力-速度関係は、ダッシュポットモデルの特性式と同一とし、弾性ばねの剛性は試験結果を用いた。

図 11 に EAE-500 の $f=1.0\text{Hz}$ 、 $A=40\text{mm}$ および 120mm の減衰力-変位関係の比較を示す。Maxwell モデルによる解析結果のほうが試験結果との対応はよいが、ダッシュポットモデルでも試験結果を十分表現できていることが確認できる。

表 3 加振条件(繰り返し耐久性)

加振条件	振動数 f (Hz)	振幅 A (mm)	サイクル数
①	0.25	80	75
②	0.25	10	1800

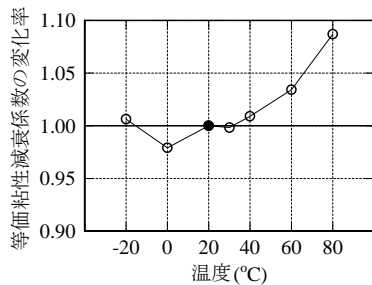
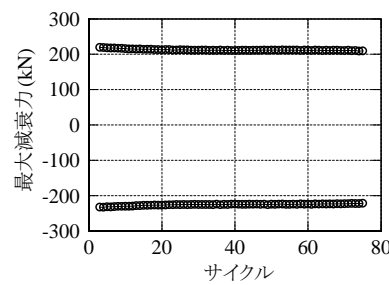
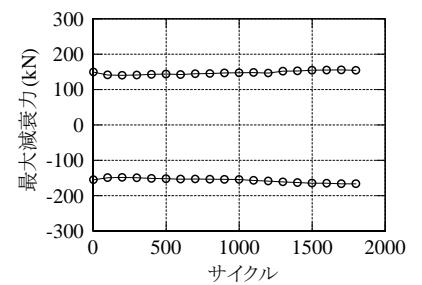


図9 等価粘性減衰係数の変化率と温度の関係

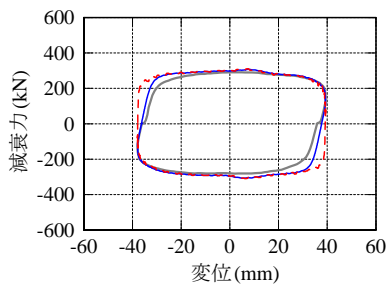


(a) 加振条件①

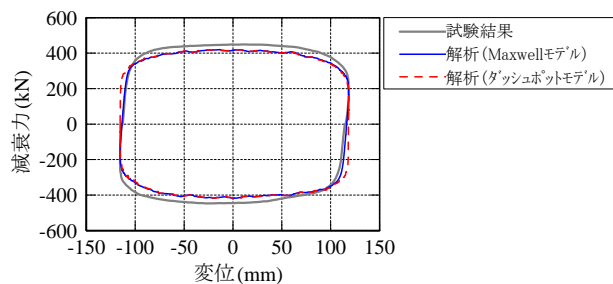


(b) 加振条件②

図 10 最大減衰力とサイクル数の関係



(a) $f=1.0\text{Hz}$, $A=40\text{mm}$



(b) $f=1.0\text{Hz}$, $A=120\text{mm}$

図 11 試験結果と解析結果の比較

§4. 粘性ダンパーを設置した免震建物の応答解析

4.1 解析概要

文献 1)では、仮想免震建物モデルで、免震層の応答変位が一定となるようにして、履歴系ダンパーと線形ダッシュポットで表される粘性系ダンパーの比率を変化させたときの応答値の変化を検討しており、粘性系ダンパーの比率が高くなると、加速度が低減され、中小地震に対しても効果があることなどが示されている。

ここでは、粘性系ダンパーを減衰力-速度関係が非線形である本ダンパーとした場合について同様の検討を行った。仮想免震建物は、純ラーメン形式のRC造9階建てモデルである。平面形状は、片側7m×4スパンで、各階の階高は3mである。免震部材は天然ゴム系積層ゴムと鉛ダンパーである。

解析は質点系応答解析とした。上部構造は弾性とした。上部構造の解析モデルの諸元を表4に示す。上部構造のみの1次固有周期は0.733secである。

鉛ダンパーをすべて粘性ダンパーに置換する場合の粘性ダンパーの量は、レベル2地震動での免震層の最大変位がほぼ同等となるように設定した。結果的にEAE-500のダンパーが6基となり、最大減衰力は鉛ダンパーの降伏耐力と同等となっている。

解析変数は、鉛ダンパーを粘性ダンパーに置換したときの粘性ダンパーの比率(VD比率)とした。比率は0~1まで線形的に7段階とした。免震層の鉛ダンパーは完全弾塑性バイリニアモデルとした。粘性ダンパーのモデルは前述のMaxwellモデルとし、取付部材は剛部材とした。各解析ケースの免震層のモデルの諸元を表5に示す。

減衰は、基礎固定の1次固有振動数に対して2%の瞬間剛性比例型とした。入力地震動は、El Centro NS, Taft EW, Hachinohe NSのレベル1, 2(最大速度: 25cm/s, 50cm/s), BCJ波レベル1, 2の計8波とした。

4.2 解析結果

図12にBCJ波レベル1およびレベル2での最大加速度、最大変位および最大層間変形角(免震層を除く)の高さ方向分布を示す。レベル1, 2ともVD比率が増えるにつれ、上部構造の加速度および層間変形角が小さくなる傾向にある。免震層の最大変位は、レベル2ではVD比率によらず、ほぼ同じであるが、レベル1ではVD比率が大きいと、変位も大きくなっている。

表4 上部構造の解析モデル

階	階高 (m)	重量 (kN)	層剛性 (kN/cm)
9	3.00	9420	11648
8	3.00	7876	12574
7	3.00	7876	13423
6	3.00	7876	15667
5	3.00	8327	18968
4	3.00	8319	20466
3	3.00	8319	23760
2	3.00	8830	29927
1	3.00	8822	45399
免震階	2.00	12826	-

表5 免震層の解析モデル

解析ケース	積層ゴム		鉛ダンパー		粘性ダンパー		VD比率
	剛性 (kN/mm)	初期剛性 (kN/mm)	降伏耐力 (kN)	ばね剛性 (kN/mm)	粘性係数 C(kN(m/s) ^α)		
VD0	15.432	375.43	2640	-	-	-	0.000
VD1	15.432	312.86	2200	66	450	0.167	
VD2	15.432	250.29	1760	132	900	0.333	
VD3	15.432	187.72	1320	198	1350	0.500	
VD4	15.432	125.14	880	264	1800	0.667	
VD5	15.432	62.57	440	330	2250	0.833	
VD6	15.432	-	-	396	2700	1.000	

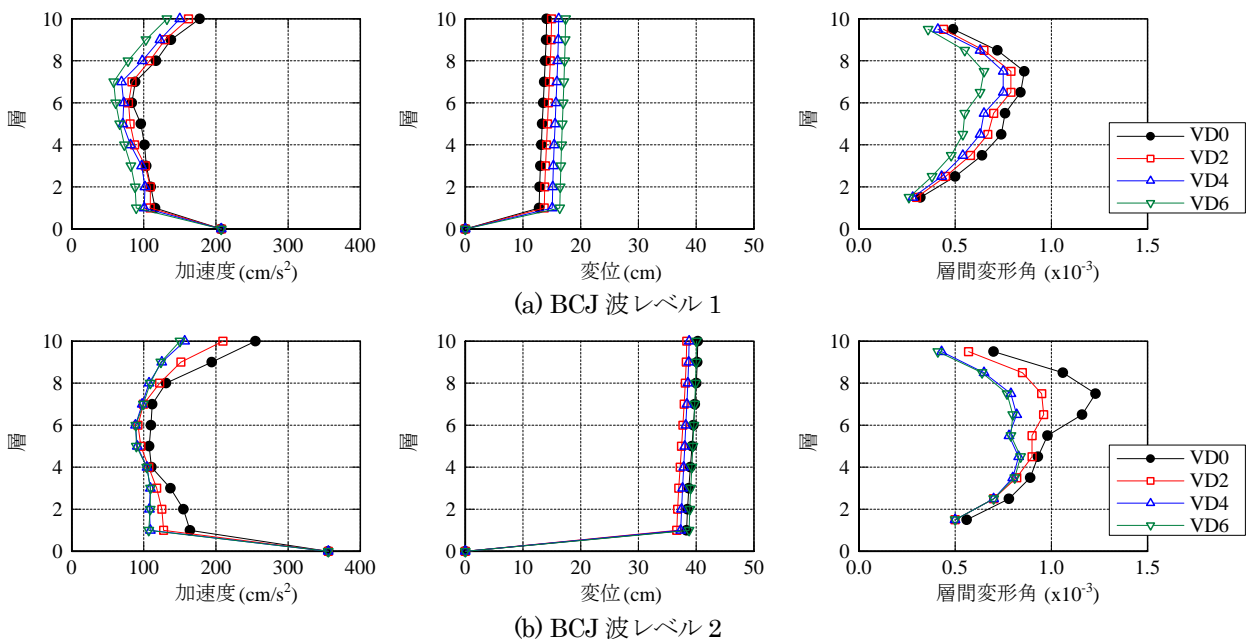


図12 最大応答値の高さ方向分布

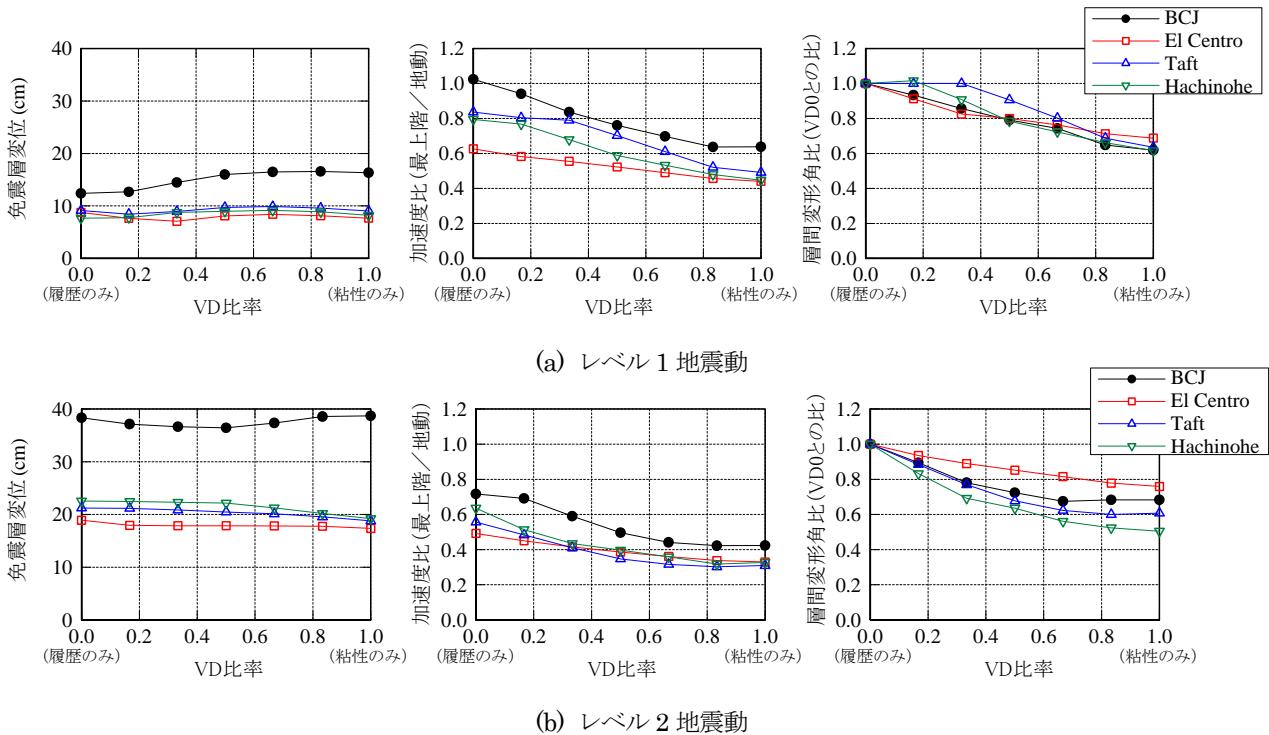


図13 最大応答値と粘性ダンパーの比率の関係

図13には全解析ケースの最大応答値(免震層変位, 加速度, 層間変形角)と粘性ダンパーの比率の関係を示す。レベル1, 2ともに, 粘性ダンパーの比率が増えるにつれ, 上部の応答加速度および層間変形角が小さくなる傾向がある。レベル1地震動の場合, 鉛ダンパーのみの場合の最大加速度は地動加速度に対して, 0.63~1.03の値であるが, 粘性ダンパーにすべて置換した場合には, 0.43~0.63となる。これは, レベル2地震動での鉛ダンパーのみの低減効果と同等であり, 低レベル入力に対する免震効果も期待できることがわかる。

図14にBCJ波レベル2でのVD0(履歴のみ)およびVD6(粘性のみ)の最上層加速度のフーリエスペクトルを示す。2.2Hz付近にピークが見られるが, ピーク振動数はVD0の方がやや高く, ピーク値もVD0の方が高い。免震層の剛性を積層ゴムの剛性として求めた固有振動数は1次:0.21Hz, 2次:2.16Hzであり, 2次モードは上部構造の1次モードと対応する。VD6の方が上部構造の振動の減衰が大きく, 応答が小さくなることに対応している。

§5. まとめ

機構が簡明な粘性ダンパーを開発し, 各種動的加力試験を通じて, 減衰力と速度の関係が設定した特性式と対応すること, 温度および繰り返し加振の影響が小さいことを確認した。

また, 仮想免震建物モデルを対象とした地震応答解析により, 鉛ダンパーと粘性ダンパーの免震効果の比較を

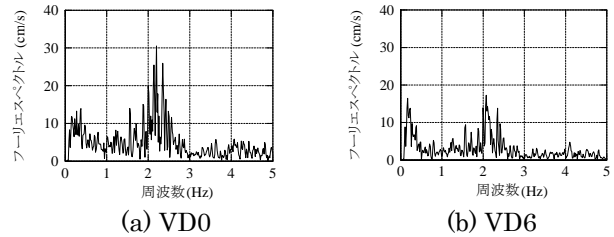


図14 最上層応答加速度のフーリエスペクトル

行った。結果として, 粘性ダンパーの比率が大きくなると, 上部構造の最大加速度が小さくなり, 低レベル入力に対する免震効果も大きくなることを確認した。

謝辞 本ダンパーの開発は上海材料研究所との共同研究によるものです。ご協力をいただいた上海材料研究所 徐 斌氏, 周 紅衛氏, 陳 濟坤氏に深謝いたします。

参考文献

- (社)日本免震構造協会技術委員会免震部材部会 ダンパー小委員会:免震部材部会ダンパー小委員会活動報告, 2007.



佐々木 康人

ひとこと

免震構造, 制振構造がより実現しやすくなるように開発を進めていきたいと思います。