

125 多層型粘弾性ダンパの保温システムに関する実験研究

Experimental study on temperature control system for multi-layered viscoelastic damper

○正 萩原 伸彦 (東亜建設工業) 正 曾田 五月也 (早稲田大学)

Nobuhiko HAGIWARA, Toa Corp. (Waseda Univ.), Yonban-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8451
 Satsuya SODA, Waseda University, Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555

Although most viscoelastic dampers are very effective to reduce vibration of building structures, their mechanical properties are, in general, so sensitive to temperature as to make seismic design of buildings subject to strong ground motion quite difficult, especially when the temperature is low. This paper presents a method for keeping the temperature of the damper always warm enough to exhibit desirable damping properties regardless of the environmental low temperature. Availability of the method that makes use of a sheet heater with positive temperature coefficient (PTC) function has been confirmed through a series of experiments on multi-layered viscoelastic damper.

keyword: viscoelastic damper, temperature-dependent property, temperature control, sheet heater, positive temperature coefficient function

1. はじめに

本研究で対象とする粘弾性ダンパは、高分子系粘弾性体が平行な鋼板の間に挿入された極めてシンプルな構造を持ち、その振幅の大小に拘わらず高い減衰力を発揮することから、耐震設計のみならず交通・機械振動対策などへの普及が期待されており、同ダンパとして特徴的な振動数依存性を精度良く模擬する力学モデル¹⁾も明らかにされている。しかしながら、温度変化にともなう剛性変化が著しく、特に、温度の低下にともなってダンパ剛性が上昇することにより、ダンパ周辺部材の地震時負担応力が増加することが、同ダンパを適用する建築物の設計を複雑化させていた。このような温度依存性に起因する難点を克服するために、面状発熱体を用いてダンパが一定温度以下に下がらないように温度管理する手法を考案し、平板型2層粘弾性ダンパに保温システムを適用することで安定した温度管理を行うことができることを示した²⁾が、さらに手法の適用範囲を拡大するための課題である多層型粘弾性ダンパへの適用性について、本稿では、4層型粘弾性ダンパに保温システムを適用した場合の基礎実験の結果を示し、多層型に対しても本手法の温度管理が有効であることを示す。

2. 温度依存性の影響と温度管理の課題

本実験で扱う4層型粘弾性ダンパ (Fig.1) は、平行な鋼板の間に粘弾性体を挿入させ、これを4層に積層させた形状である。

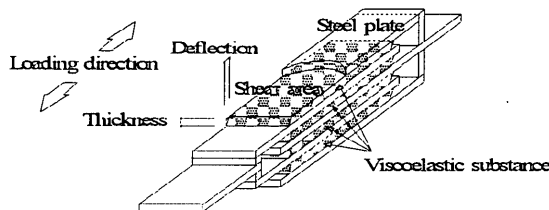
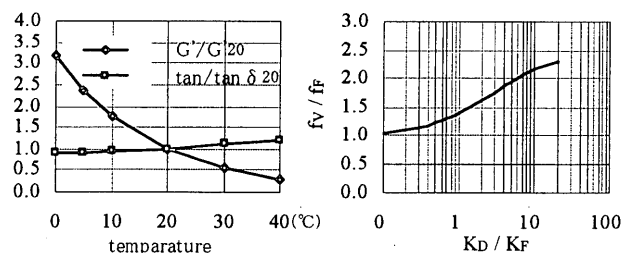


Fig.1 Basic mechanism of damper

本研究で用いる粘弾性体はジエン系ゴム材料であり、同材料の調和加振より得られた貯蔵弾性率 G' と損失正接 $\tan \delta$ のそれぞれについて、 $0^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ の温度範囲でとる値を 20°C の値 (G'_{20} および $\tan \delta_{20}$) により規準化して表示したものを Fig.2 (a) に示す。常温と考える 20°C の値に対して $\tan \delta$ は $0.9 \sim 1.2$ 倍程度の変化であるのに対して、剛性の変化は $3.2 \sim 0.3$ 倍にも達することがわかる。ダンパの剛性変動が建築物の固有周期に与える影響は、複素減衰系モデルを用いた方法³⁾によれば Fig.2 (b) として示される。



(a) storage modulus and loss tangent (b) stiffness and frequency ratio

Fig.2 Normalized temperature dependent of damper

ダンパ剛性 K_D とフレーム剛性 K_F の比 K_D/K_F が数倍増加すると、ダンパ付きフレームの振動数 f_v とフレームのみの振動数 f_F の比 f_v/f_F は2倍近く増加する。これより、低温時に温度依存性によってもたらされるダンパ剛性の上昇は、建築物全体の固有振動数を増加させて、地震時の応答加速度を上昇させるとともにダンパの周辺部材の負担応力を増加させることが予想される。従って、高温側より優先して低温側の対策を必要としており、粘弾性ダンパの温度管理として保温システムを用いる。以下の温度管理におけるポイント、

- ①均一性の高い加熱方式であること
- ②発熱立ち上がり時間が短く温度制御が容易であること
- ③加熱の影響による粘弾性体の老化を防止すること
- ④ダンパの損傷や火災に至らない発熱温度であること

を考慮して本研究では、面状発熱体を熱源として選択している。

3. 保温システムの概要

3.1 面状発熱体の概要

使用する面状発熱体はいずれも厚さ 1mm 程のシート状のヒータで、発熱体が絶縁材で覆われた構造 (Fig.3) をしており、電圧 AC100V を印加することで均等に全面発熱し高い熱効率が得られる。発熱性能は、発熱面積当たりの消費電力である電力密度で規格され、この数値が大きいほど発熱量が大きいことを意味する。

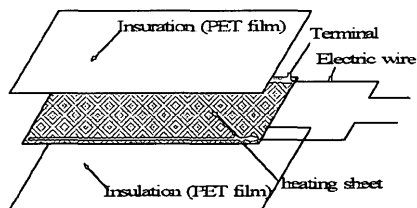


Fig.3 Component of sheet heater

(1) PTC 機能を持つ面状発熱体

発熱体は、導電性塗料と綿織物の複合体で自己温度制御機能 (Positive Temperature Coefficient function: PTC 機能) を示すことが特徴である。発熱体は絶縁保護用 PET フィルムでラミネート加工されている。PTC 機能とは、設定された発熱体固有の温度 (例えば 60℃) に近づくと電気抵抗が急激に増大し、それ以降通電を続けても温度上昇が抑制され、一定の発熱温度を持続するものである。

(2) PTC 機能のない面状発熱体

発熱体は、ニッケル合金抵抗体で金属導体としては高い柔軟性を持つことが特徴であり、絶縁保護用シリコンゴムと一体成形され耐久性にも優れる。しかし、PTC 機能を備えないため、発熱体の温度制御を行う必要がある。

3.2 面状発熱体の発熱特性と PTC 機能

発熱体の PTC 機能を確認するため、本稿で使用する PTC 機能付に加えて Table-1 の発熱体単体の実験を行った。

Table-1 Properties of sheet heater

Material	density W/m ²	isolation sheet	PTC	Wide mm	Length mm
PTC ink	750	PET film	yes	260	110
PTC ink	750	silicone rubber	yes	260	110
PTC ink	250	PET film	yes	260	220
nickel alloy	1100	silicone rubber	non	260	110
nickel alloy	900	silicone rubber	non	260	110
nickel alloy	250	silicone rubber	non	260	220

厚さ 0.5mm、大きさ 220×260mm のアルミ板の片面に発熱体を貼付し 20℃ 気中に放置して連続通電させた場合の発熱体表面の温度履歴が Fig.4 である。いずれも通電開始から 10 分程度で温度上昇が頭打ちされた。ニッケル合金抵抗体の発熱体 (900W/m²) は、導電性塗料の発熱体 (750W/m²) に比較して表面温度がやや低い。また、同一の電力密度でも絶縁材の違いにより表面温度が異なり、PET フィルムの場合はシリコンゴムより表面温度が高い。これより、20℃ 気中に放置した場合では、発熱体表面から

空气中へ熱消散してしまうことから、発熱体方式の違いによる発熱特性の相違が明確に示されなかった。

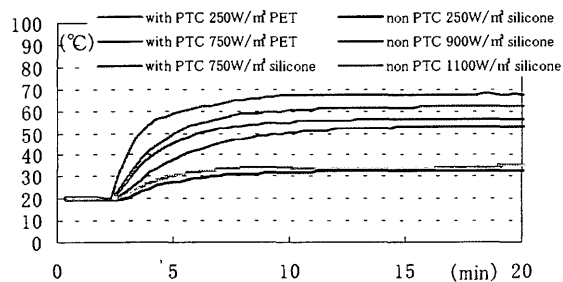


Fig. 4 Characteristics of sheet heater

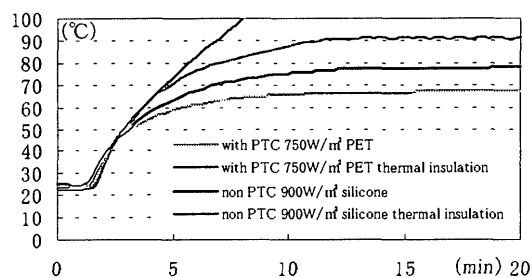


Fig.5 Characteristics of sheet heater (thermal insulation)

そこで、さらに上記と同じくアルミ板に貼付した発熱体をグラスウールと発泡樹脂版で挟み込み、断熱状態とした発熱体に連続通電した結果を Fig.5 に示す。20℃ 気中に放置した状態では各発熱体と同じような温度履歴を示したが、発熱体を断熱し表面からの熱消散を抑制した状態ではその温度履歴に明らかな相違が認められた。すなわち、導電性塗料の発熱体は 90℃ を超えると温度上昇がほぼなくなり PTC 機能による自己温度制御を確認できたが、PTC 機能を持たないニッケル合金抵抗体の発熱体では、単調に温度上昇が続き 200℃ で実験を中止させた。このような PTC 機能を持たない発熱体では、別途に発熱体自体の温度を監視して、その温度制御を行う必要があることがわかった。

3.3 ダンパの保温システムの構成

4 層型粘弾性ダンパにおける保温システムの基本構成を Fig.6 に示す。

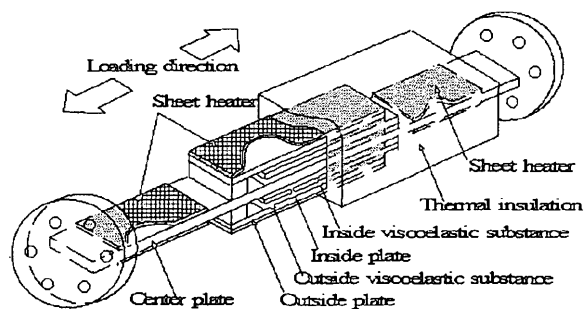


Fig.6 Component of Thermal Insulation System

4. 実験概要

4.1 ダンパー試験体

実験で使用するダンパ試験体の寸法を Fig.7 に示す。ジエン系ゴム材料の粘弾性体は厚さが 15mm、幅・長さが各

220mm, 180mm の 4 層積層型である。ダンパの形状係数は 4 面せん断であるため $S/d=1056\text{cm}$ となり、鋼板には SS400 材を使用している。

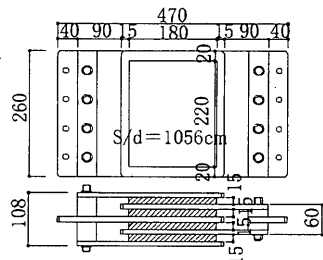


Fig.7 Four layer test VED

4.2 接合部断熱部材

ダンパに供給される熱消散を緩和させる断熱材をダンパ接合部に挿入する。断熱材料は、接合部の応力を十分に伝え得る高弾性・高靱性材料である必要がある。本研究では高靱性型セメント複合材料 (Engineered Cementitious Composites: ECC) ⁴⁾ であるビニロン短繊維補強モルタルを採用した。その熱伝導率 (0°C , $\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot\text{deg}$) は 0.0039 で、鉄 (0.129) の 1/33 である。Table-2 に断熱材の概要を示す。

Table-2 Properties of ECC plate

Wide	Length	Thickness	Bolt hole	Fiber leng.	Quantity of fiber	W/C
260mm	35mm	10mm	$\phi 13\text{mm} \times 4$	15dtex $\times 6\text{mm}$	0.25%	30%

4.3 実験方法

内法寸法が幅 500mm・奥行 650mm・高さ 1200mm の恒温槽を加振装置に取り付け、これに試験体を設置して以下の要領にて実験した。実験装置の概要を Fig.8 に示す。

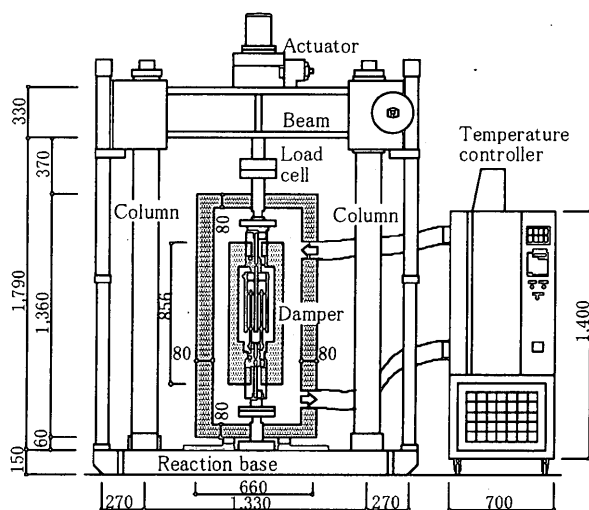


Fig.8 Experimental equipment

① 試験体の設置方法

試験体は、恒温槽内に縦に支持され、上下の取付用 H 鋼 (BH-324 $\times 100 \times 12 \times 12$ L=216mm) に接続する。試験体は周囲を厚 75mm の断熱材で覆われている。

② 試験体の温度管理方法

発熱体の制御は、内部鋼板の下部端面に K 型熱電対を貼付し、温度調節器 (横河電機製 DT-350) を使用して発熱体の通電を ON-OFF 制御により行った。

③ 加振方法

試験体を恒温槽内に設置した状態で、振幅 $\pm 50\text{mm}$ の 20tf アクチュエータにより上下方向に正弦波加振して粘弾性体にせん断変形を与える。

4.4 計測方法

保温実験では、外側と内側の粘弾性体層に Fig.9 に示す位置 1-a から 6-c の 18 箇所に K 型シーす熱電対 (径 0.5mm・シーす長 150mm) を挿入して、粘弾性体内の温度を計測した。また、面状発熱体の表面に 3 点、試験体鋼板の表面に 8 点、それぞれ K 型熱電対を貼付し、各点の温度を計測した。

加振実験では、粘弾性体内の温度を K 型シーす熱電対により 2 点、変形をレーザー変位計により 2 点、抵抗力をアクチュエータ付属の 20tf ロードセルにより計測した。

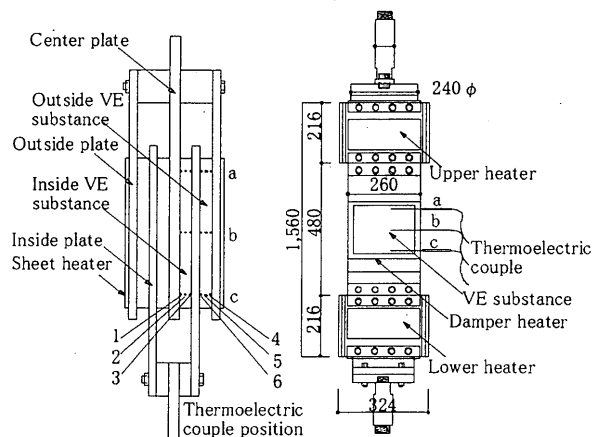


Fig.9 Thermoelectric couple and sheet heater set-up

5. 実験結果および考察

5.1 接合部のみ加熱と断熱材を挿入した検討

文献 ²⁾ よりダンパ接合部からの加熱が有効であることが確認されたので気中温度 -5°C のもとで、

【実験 1】 接合部のみを加熱した場合

について実験 1 を行った。上下の取付用 H 鋼にのみ導電性塗料型 $800\text{W}/\text{m}^2$ の発熱体を貼付した結果を Fig.10 に示す。粘弾性体温度が加熱から約 8 時間後に 20°C に達し、その後はほぼ一定である。

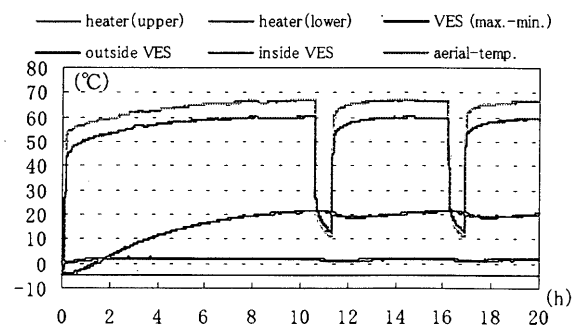


Fig.10 Temperature history of attached heater to joints

また、粘弾性体内の温度差も 2°C 程度で推移し極めて小さく、接合部側からの加熱が粘弾性体内の均一な温度分布に有効であることがわかる。しかし、温度履歴より発熱体はほぼ連続して通電されており、実験 1 の発熱量では十分ではない。電力密度の増大も考えられるが、熱消散を緩和する断熱材を取付用 H 鋼と接合治具の間に挿入することにした。断熱材の挿入以外の条件は実験 1 と同様で、厚さ 10mm と 25mm の 2 種の ECC 板を用い、

【実験 2】 接合部の加熱と断熱材 (10mm) を挿入した場合

【実験 3】 接合部の加熱と断熱材 (25mm) を挿入した場合について実験 1 と 2 を行った。断熱材厚 10mm での結果を Fig.11 に、断熱材厚 25mm での結果を Fig.12 に示す。

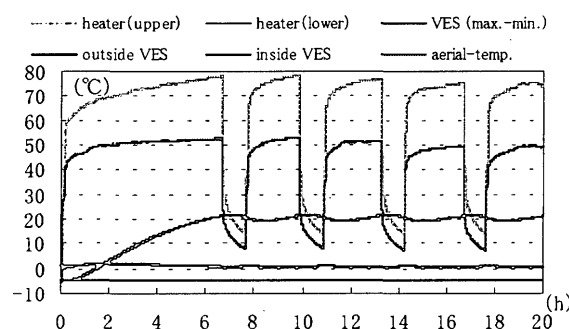


Fig.11 Temperature history of attached heater to joints with ECC (thickness 10mm)

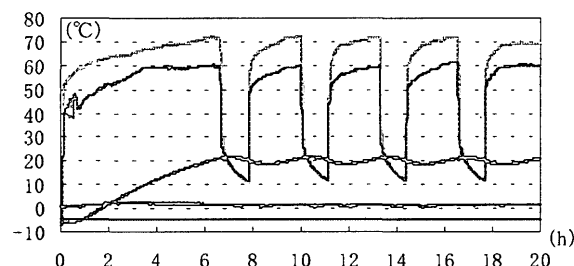


Fig.12 Temperature history of attached heater to joints with ECC (thickness 25mm)

粘弾性体温度は、断熱材厚に拘わらず加熱から約 6 時間後に 20°C に達し、実験 1 より 2 時間短縮したが、発熱体の通電時間の短縮効果は小さい。また、断熱材厚の違いは、厚 25mm の場合に発熱体の最高温度が約 10°C 上昇している点を除けば、断熱材厚を増した効果はほとんどなく、断熱材厚は 10mm で適当と考えられる。

5.2 接合部とダンパ部の加熱と断熱材を併用した検討

前項の接合部のみの加熱では、接合部に断熱材を挿入してもその効果は限定的であった。電力密度を増大させずに比較的低い発熱温度で保温を可能とするためには、ダンパ部を直接に加熱する必要があると考えられたので、

【実験 4】 接合部とダンパ部の加熱と断熱材併用の場合について、発熱温度が 40°C 以下 (Fig.4 参照) である電力密度 $250\text{W}/\text{m}^2$ の発熱体を外部鋼板の外側 2 面に追加貼付して実験を行った。

Fig.13 から、粘弾性体温度は加熱から 4 時間以内に 20°C に達し、実験 1 の必要時間を半減させている。また、発熱

体への通電時間もほぼ 1 時間毎の ON-OFF になり大きく短縮したことがわかる。粘弾性体内の温度差は、加熱開始時に最大 7°C に拡大したが、その後は 5°C 程度で推移した。

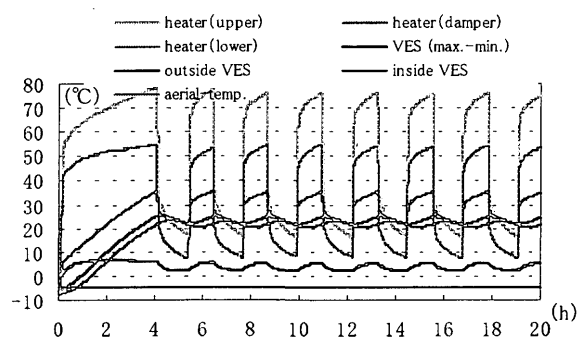


Fig.13 Temperature history of attached heater to damper and joints with ECC (thickness 10mm)

以上より、接合部に断熱材として厚 10mm の ECC モルタル版を挿入し、発熱体の電力密度を接合部側の $750\text{W}/\text{m}^2$ に対してダンパ部をその $1/3$ の $250\text{W}/\text{m}^2$ とすることにより、高い保温性能が得られた。

5.3 保温システムの有無による履歴ループの相互比較

前項の結果より、保温システムを用いた 4 層型粘弾性ダンパ内の温度分布には概ね 5°C 程度のばらつきが認められたことから、保温されたダンパと一般の状態のダンパについて履歴特性の相違を加振実験によって比較検討した。加振実験は、ダンパを恒温槽に設置した状態で上下方向に正弦波加振して粘弾性体にせん断変形を与えた。なお、保温付きダンパは Table-3 のもとで実施した。本実験で得られた履歴ループを Fig. 14~19 に示す。

Table-3 Condition of heat insulation

	Condition
Aerial temperature	Fixed temperature at -5°C
Watt density of heater	Joint $750\text{W}/\text{m}^2$ + Damper $250\text{W}/\text{m}^2$
Inside temperature of VED	$20^{\circ}\text{C} \pm 2.5^{\circ}\text{C}$

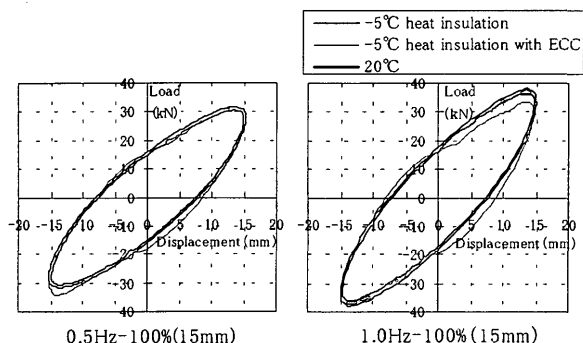


Fig.14 Loading test results for four layer VED with Heat Insulation System at 100% damper strain

保温システムを用いて -5°C の気中で 20°C に温められたダンパと 20°C 気中の一般の状態のダンパでは、履歴ループがいずれもほぼ重なっており、両者の履歴ループに相違は認められなかった。接合部に断熱材を挿入した場合に、

実験時のボルト締付けが充分でなく摩擦接合面のすべりにより履歴ループにガタが生じたが、対策を行うことが可能であるため本稿にそのまま示した。以上より、本保温システムは、粘弾性体層を4層とする粘弾性ダンパに対しても履歴特性に与える影響が極めて小さいものと考えられる。

6. 結論

本研究では、多層型粘弾性ダンパを対象に、その低温側の温度依存性の問題点を克服するため、PTC 機能を有する面状発熱体を用いた保温システムを実験的に検討した。得られた知見を要約すると以下の通りである。

- ① ダンパ接合部の鋼板に発熱体を貼付して接合部側を主に加熱し、接合部から外部に消散する熱を補填する保温方法が、粘弾性体内部の温度分布を均一に加熱することに有効である。
- ② ダンパ接合部に複合セメント材料の断熱材を挿入することにより、加熱時の温度上昇時間を短縮させることが可能で、その厚さは 10mm 程度が効果的である。
- ③ ダンパの接合部側の加熱で熱消散を補填しつつ、ダンパ部を 40℃以下の低い温度で加熱することで、粘弾性体内部の温度差を拡大させずに加熱時の温度上昇勾配が高めらる。その際、接合部側とダンパ部の発熱体の電力密度比を3対1程度にすることが、発熱時間の短縮化に極めて有効である。
- ④ 保温システムを多層型粘弾性ダンパに適用することにより、損失正接 $\tan \delta$ が大きく履歴特性の単純な線形粘弾性ダンパの優れた特性を損なうことなく同ダンパの適用範囲を低温側に拡大することが可能である。

文 献

- 1) 曾田五月也, 高橋雄司: ランダム加力による粘弾性ダンパーの振動数依存性の定量化, 日本建築学会構造系論文集(1997.8), No.498, pp43-49
- 2) 萩原伸彦, 樋渡健, 柿本和茂, 曾田五月也: 面状発熱体による粘弾性ダンパーの温度管理(その 1・2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(2001), B-2, pp319-322
- 3) 曾田五月也, 高橋雄司: 粘弾性ダンパーの応用による建物の耐震設計法, 早稲田大学理工総研プロジェクト研究シンポジウム梗概集(1998), pp41-48
- 4) 佐藤幸博, 福山洋, 金久保利之: 高靱性型セメント複合材料の基本的力学特性, コンクリート工学年次論文報告集(1999), Vol.21, No.3, pp1435-1440