

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパーの特性および正弦波による評価手法
Title	PROPERTIES OF VISCOELASTIC DAMPER DURING LONG DURATION RANDOM VIBRATION AND EVALUATION METHOD USING SINUSOIDAL-WAVE
著者(和文)	佐藤大樹, 笠井和彦
Authors	daiki sato, Kazuhiko Kasai
出典 / Citation	構造工学論文集, Vol. 53B, No. , pp. 67-74
Citation(English)	Journal of structural engineering, Vol. 53B, No. , pp. 67-74
発行日 / Pub. date	2007, 3
rights	日本建築学会
rights	本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
relation	isVersionOf: <a href="http://ci.nii.ac.jp/naid/110009706048">http://ci.nii.ac.jp/naid/110009706048</a>

## 長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパーの特性および正弦波による評価手法

PROPERTIES OF VISCOELASTIC DAMPER DURING LONG DURATION RANDOM VIBRATION  
AND EVALUATION METHOD USING SINUSOIDAL-WAVE

佐藤 大樹\*, 笠井 和彦\*\*

Daiki SATO and Kazuhiko KASAI

This paper discusses the properties of viscoelastic damper during long duration random vibration. In this study, the long duration model of viscoelastic constitutive rule, which is based on fractional time-derivative model & capable for heat transfer analysis, is used to evaluate viscoelastic damper properties such as temperature dependence, stiffness etc. Analytical results show that temperature inside the viscoelastic material body become stable by effect of heat conduction & heat transfer even if the damper is vibrating randomly. In addition, this paper proposes a simplified evaluation method using sinusoidal-wave to substitute random time history data properties. Accuracy of proposed evaluation method is validated by comparing with analysis result using random time history data.

**Keywords :** Viscoelastic Material, Fractional Derivative, Duration, Random Vibration, Heat Conduction, Heat Transfer

粘弾性体, 分数次導関数, 継続時間, ランダム振動, 熱伝導, 熱伝達

## 1. はじめに

## 1. 1 背景

高層建物の居住空間に風によって振動が発生すると、居住者は不快に感じるばかりではなく、生活を営むうえで支障をきたすこともある<sup>1)</sup>。そのため、最近建設されている高層建物では、地震時の安全性はもちろんのこと、日常吹くような風に対する居住性を高めるために、ダンパーを設置した制振構造が採用されている<sup>2),3)</sup>。日本では数多くのダンパーが研究・開発されているが、その中でも粘弾性ダンパーは、風や交通振動等によって発生する微小変形から、大地震の非常に大きな変形まで安定したエネルギー吸収性能を発揮することが知られている<sup>4)</sup>。

一般に、粘弾性ダンパーは温度依存性を有し、振動時に吸収した振動エネルギーを熱へと変換するため温度が上昇する<sup>5)</sup>。そのため継続時間が地震に比べて遥かに長い風応答の制振に粘弾性ダンパーを用いる場合には、長時間の振動によるダンパー特性の変化を把握する必要がある。これまでに、曾田ら<sup>6)</sup>、笠井ら<sup>7)</sup>などにより長時間の正弦波加振実験が行われている。その結果、エネルギー吸収により粘弾性ダンパーの温度は上昇するが、熱伝導・伝達の効果により、ある時点で温度が定常状態となるため、長時間振動時においても粘弾性ダンパーの剛性が低下し続けることは無く一定値となることが確認された<sup>7)</sup>。しかし、これらの結果は、長時間の正弦波を入力とした場合であり、実際の風応答時のようなランダム波を入力とした際のダンパー特性についてはこれまで検討されていない。

また、粘弾性ダンパーは振動数依存性も有するため、粘弾性体の

エネルギー吸収による発熱量は、入力の振動数特性によって変化する。そのため、様々な振動数成分を有する長時間ランダム振動時のダンパー特性を、1つの振動数成分しか有しない正弦波で評価することの妥当性は明らかでない。

## 1. 2 本論文の目的と構成

継続時間が長い振動時の粘弾性ダンパーの特性の変化を精度良く再現できる、分数微分構成則（以下、長時応答解析法）が笠井らにより提案されている<sup>7)</sup>。本論文では、長時応答解析法を用いてランダム振動時のダンパー特性を把握し、さらに、正弦波によってランダム振動時のダンパー特性を評価する手法（以下、正弦波置換法）を提案することを目的とする。本論文で提案する正弦波置換法は、長時間のランダム波を作成する必要がなく、正弦波で長時間のランダム振動時の温度上昇やダンパーの剛性低下などのダンパー特性の変化を簡便に評価でき、これまで行われてきた正弦波による実験の妥当性を示すだけでなく、定常状態の理想化された理論や計算法に適用できるものである。

以下に、本論文の構成を述べる。2章では長時応答解析法に用いる、長時間のランダム時刻歴波形の作成方法やランダム波の特性、および粘弾性ダンパーについて述べる。3章では、長時応答解析法での時刻歴解析を行い、長時間のランダム振動時のダンパー特性の変化について考察する。4章では、正弦波置換法について述べ、ランダム波での解析結果とダンパー特性を比較することで、本論文で提案する正弦波置換法およびこれまで行われてきた正弦波によるダンパー加振試験の妥当性を示す。

\* 東京工業大学都市地震工学センター 研究員 博士(工学)

\*\* 東京工業大学建築物理研究センター 教授 Ph.D.

Researcher, Center of Urban Earthquake Eng., Tokyo Institute of Tech., Dr.Eng. Prof., Structural Eng. Research Center, Tokyo Institute of Tech., Ph.D.

2. ダンパー変形波形および解析対象ダンパーの概要

2.1 ダンパー変形波形の作成方法

本論文では、継続時間の長い外乱下での粘弾性ダンパーの特性を評価するために、文献7で提案した長時応答解析法を用いる。長時応答解析法は、熱伝導・伝達を考慮した分数微分構成則により長時間振動時のダンパー履歴を精度良く再現できる時刻歴解析手法である。長時応答解析法に用いるダンパー変形のランダム時刻歴波形は、一質点モデルで風方向および風直角方向の風力時刻歴による時刻歴応答解析を行い、得られた変形波形を基準化して用いる(後述)。

本論文では風力時刻歴波形を作成するにあたり、高さ200m、幅・奥行きが等しく50mの建物を想定し、再現期間500年、粗度区分をⅢとして<sup>8)</sup>、文献8のパワースペクトル密度(PSD)をもとに、風方向および風直角方向風力の定常ランダム時刻歴波形をAR法<sup>9)</sup>により作成した。継続時間 $T_0$ は風方向、風直角方向ともに3,000秒、解析時間刻みは $\Delta t = 0.01$ 秒とした。

作成した風方向・風直角方向の風力PSD  $S_f(f)$ を図1に示す。なお、図1の縦軸は、振動数 $f$ および風方向・風直角方向の風力PSDの面積から得られる分散 $\sigma^2$ を用いてそれぞれの $S_f(f)$ を無次元化している。また、図中の一点鎖線は後述する一質点モデルの固有振動数 $f_0$ (左から、 $f_0 = 0.11, 0.17, 0.33$  Hz)を表している。図1より、風方向と風直角方向の風力ではPSDの形状が異なることが分かる。また、

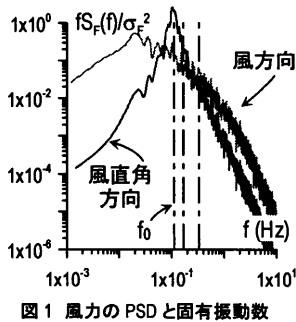


図1 風力のPSDと固有振動数

表1 入力用ランダムダンパー変形の統計値

		最大値 (cm)	最小値 (cm)	標準偏差 (cm)	PF	$N_0^+$
風方向	A-3L	1.958	-1.919	0.467	4.157	863
	A-3H	2.280	-1.573		4.878	505
	A-6L	1.668	-1.552		3.550	432
	A-6H	2.180	-1.517		4.647	324
	A-9L	1.480	-1.479		3.153	300
	A-9H	1.700	-1.248		3.626	258
風直角方向	C-3L	1.673	-1.629	0.467	3.574	865
	C-3H	1.861	-1.834		3.962	455
	C-6L	1.369	-1.495		3.209	445
	C-6H	1.600	-1.908		4.051	395
	C-9L	1.331	-1.356		2.906	324
	C-9H	1.414	-1.351		3.023	317

風方向のPSDは、建物の固有振動数に比べ低振動数側にパワーをもつ広帯域な形状であるのに対し、風直角方向のPSDは0.1Hz周辺に鋭いピークを有する狭帯域な形状となっている。通常、風方向風力は平均成分を有するが、平均成分を有する変形が、粘弾性ダンパーの特性および温度上昇に与える影響が不明であるため、本論文では長時応答解析法でのダンパー変形波形に、平均成分を有さない変動成分のみの風力に対する応答解析結果を用いる。平均成分を有するランダム波に対するダンパー特性については今後の課題とする。

固有周期 $T_0 = 3, 6, 9$ 秒 ( $f_0 = 0.33, 0.17, 0.11$  Hz)について、それぞれ減衰定数 $\xi_0$ を2%, 10%とした合計6種の1質点モデルを用いて、風方向および風直角方向の風力時刻歴波形で時刻歴応答解析を行った。その後、得られた変形時刻歴波形を、文献7で入力として用いた正弦波と同じ標準偏差 $\sigma_0 = 0.467$ cmとなるようにそれぞれを基準化し、それらを長時応答解析法でのダンパー変形波形として用いる。

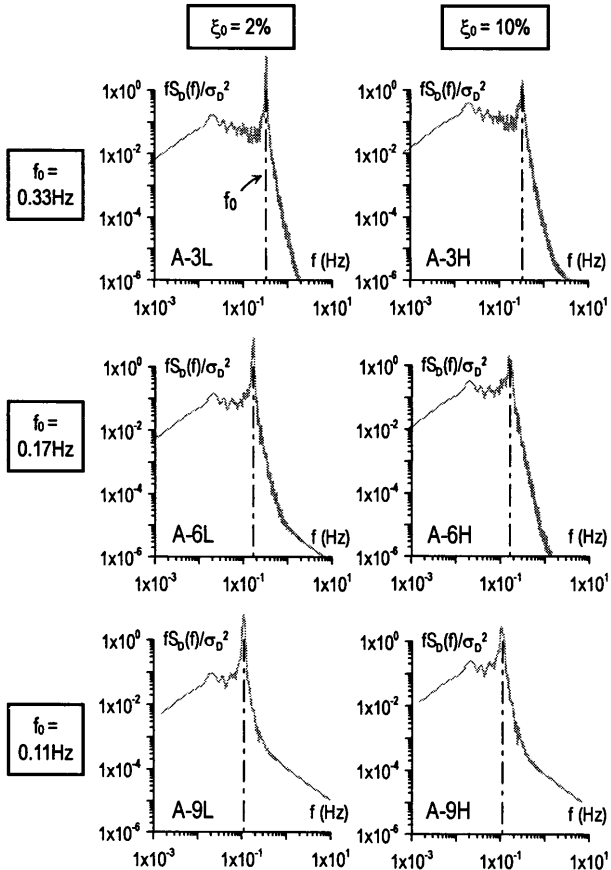


図2 風方向振動時のダンパー変形のPSD

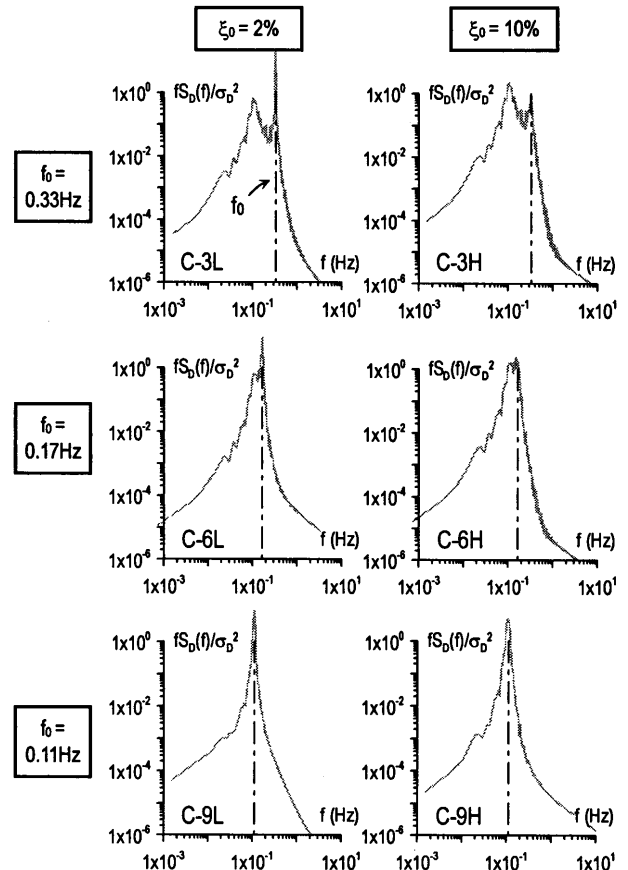


図3 風直角方向振動時のダンパー変形のPSD

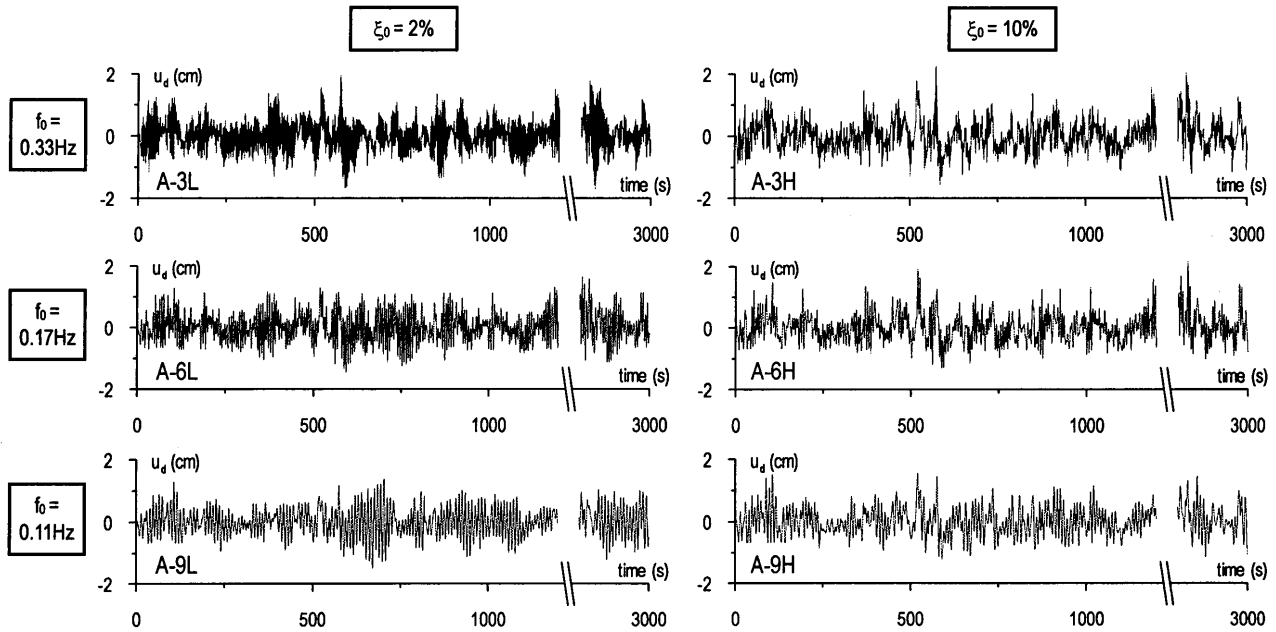


図4 風方向振動時のダンパー変形の時刻歴波形

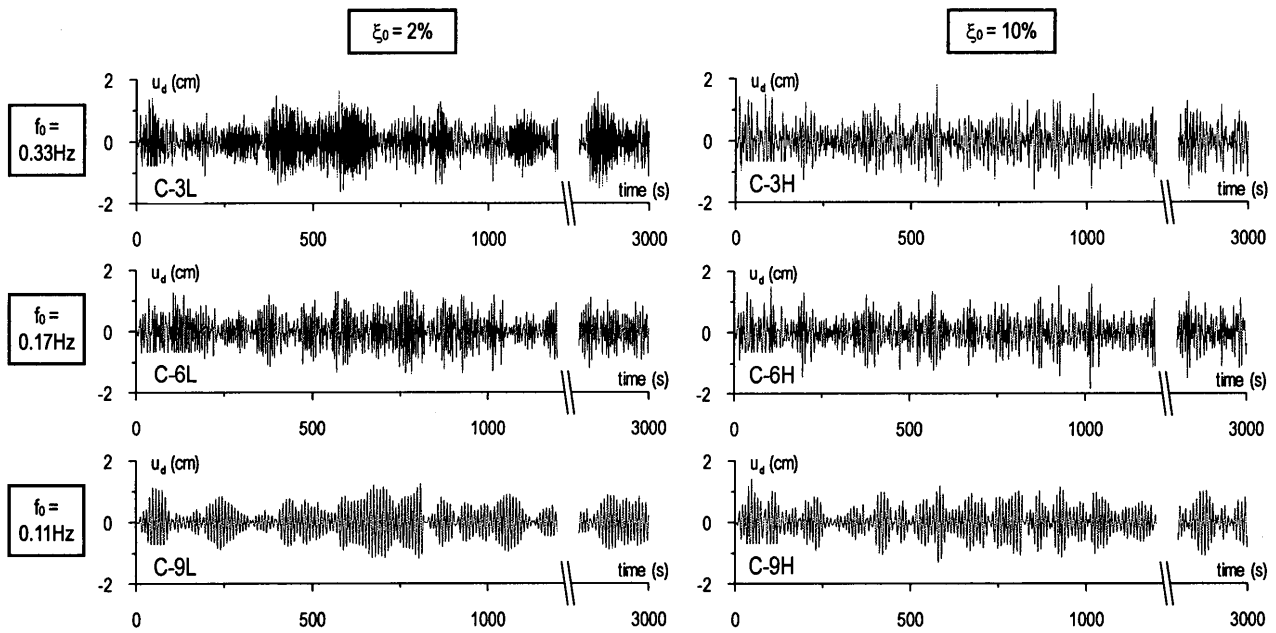


図5 風直角方向振動時のダンパー変形の時刻歴波形

## 2. 2 ダンパー変形波形の振動数特性

解析に用いたダンパー変形の統計値を表1(前頁)に示す。ここで、表中のA = 風方向 (Along direction)、C = 風直角方向 (Cross direction)、L = 低減衰 (2%, Low damping)、H = 高減衰 (10%, High damping)、数字は1質点モデルの固有周期を意味する。また、PF = ピークファクター (= 最大値 / 標準偏差)、 $N_0^*$  = 3,000秒間で変形波形がゼロ軸を正の傾きで超える数 (以下、繰返し数) である。これらの変形は、階高を4mとした場合、0.5%程度の層間変形角を想定している。

図2, 3(前頁)に風方向および風直角方向でのダンパー変形のPSDを示す。図2, 3の縦軸は図1と同様に、ダンパー変形のPSD  $S_D(f)$  を、振動数  $f$  およびダンパー変形のPSDの面積から得られる分散  $\sigma^2$  を用いて無次元化している。図中の一点鎖線は1質点モデルの固有振動数  $f_0$  を意味する。また、図4, 5に風方向および風直角方向での

ダンパー変形  $u_d$  の時刻歴波形を示す。

$\xi_0 = 2\%$  の場合は、減衰が小さいため固有振動数成分が卓越したPSDの形状となるが、風方向の風力は1質点モデルの固有振動数に比べ低振動数側にパワーを有するため(図1)、ダンパー変形の時刻歴波形は、低振動数成分と固有振動数成分が混ざった波形となる。一方、 $\xi_0 = 10\%$  でのダンパー変形波形のPSDは、減衰が大きいため固有振動数成分が少なくなり風力による強制振動成分が多くなる。そのため、ダンパー変形波形も低振動数成分を多く含む、よりランダム性の強いものとなることが分かる。

風直角方向の風力は、固有振動数付近に狭帯域なピークを有するPSDの形状であるので(図1)、 $\xi_0 = 2\%$ 、 $10\%$  両方のダンパー変形のPSDも狭帯域な形状となる(図3)。また、 $T_0 = 9$ 秒のモデルでは、1質点モデルの固有振動数と風力のPSDのピークが一致するため、ダンパー変形の振動数成分の殆どが固有振動数となる正弦波に近い

ものとなる。そのため、PFは、 $\xi_0 = 2\%$ で $T_0 = 9$ 秒のダンパー変形(C-9L)が最も小さい値となる(表1)。

### 2.2 解析対象ダンパーおよび解析パラメータ

解析の対象となる粘弾性ダンパーは、文献7と同じ $50.8 \times 30.7 \times 13.3$  mmのアクリル系粘弾性体2枚をそれぞれ中板の両面に接着した2面せん断型で、中板・外板の厚さは4.8 mmである(図6)。この場合、粘弾性体の厚さをダンパー変形の最大値(表1)で除した見かけ上の最大歪 $\gamma_{eq}$ は130%程度、歪の標準偏差は約35%である。

長時応答解析法は、粘弾性ダンパーを厚さ方向に要素分割した、任意の位置 $j$ での温度 $\theta_j$ 、歪 $\gamma_j$ を求めることができ(応力 $\tau$ は厚さ方向に一定)、長時応答解析法の構成則は次式で表される<sup>7)</sup>。

$$\tau + a_j D^\alpha \tau = G[\gamma_j + b_j D^\alpha \gamma_j] \quad (1)$$

ここで、 $D^\alpha (=d^\alpha/dt^\alpha)$ は分数微分演算子を表す。 $\alpha$ は分数微分の次数、 $a_j, b_j, G$ は構成則のパラメータである。式(1)の計算手法については文献7を参照されたい。長時応答解析法に用いるパラメータ<sup>7)</sup>は、 $\alpha = 0.609, G = 6.516$  N/cm<sup>2</sup>,  $a_{ref} = 0.0115, b_{ref} = 21.157, p_1 = 19.5, p_2 = 80.2, \theta_{ref} = 0.2^\circ\text{C}, s\rho$ (粘弾性体) = 194 N/cm<sup>2</sup>/°C,  $s\rho$ (鋼板) = 364 N/cm<sup>2</sup>/°C,  $\kappa$ (粘弾性体) = 0.188 N/sec/°C,  $\kappa$ (鋼板) = 43.13 N/sec/°Cとし、ダンパー初期温度と周辺温度は24°Cとする。ここで、 $a_{ref}, b_{ref}$  = 基準温度 $\theta_{ref}$ での $a, b$ の値、 $s$  = 比熱、 $\rho$  = 密度、 $\kappa$  = 熱伝導係数である。ダンパーの分割数も文献7と同様に、中板の半分までをモデル化し(図6)、粘弾性体、外板、中板の順に12, 4, 2分割して計18要素を用いた。また、温度の表示位置として、図6に示す、外板の外気側(A点)、粘弾性体の厚さ方向1/4(B点)と1/2(C点)の位置、そして中板厚さの中心(D点)の計4ヶ所とする。

一般に、熱伝達係数は物体周りの対流の有無や材料の表面状態など様々な要因によって変化する<sup>10)</sup>。そのため、長時応答解析法に用いる中板・外板側の熱伝達係数 $\alpha_{c,in}, \alpha_{c,out}$ <sup>7)</sup>も、厳密には文献7での正弦波振動時と、本論文でのランダム振動時では異なる値となると思われるが、ランダム振動時の熱伝達係数を厳密に決定することは大変困難である。そこで本論文では、熱伝達係数の違いによりダンパーの局所的な温度分布は異なるものの、そのことがダンパー全体の特性に与える影響は小さいこと<sup>7)</sup>、さらには、ランダム波の卓越振動数(図2, 3)が文献7で行った正弦波振動時(0.33Hz)と大きな違いはないことなどの理由から、本論文での中板・外板側の熱伝達係数は文献7と同じ $\alpha_{c,in} = 0.524$  N/s/cm<sup>2</sup>/°C,  $\alpha_{c,out} = 0.956$  N/s/cm<sup>2</sup>/°Cを用いることとした。

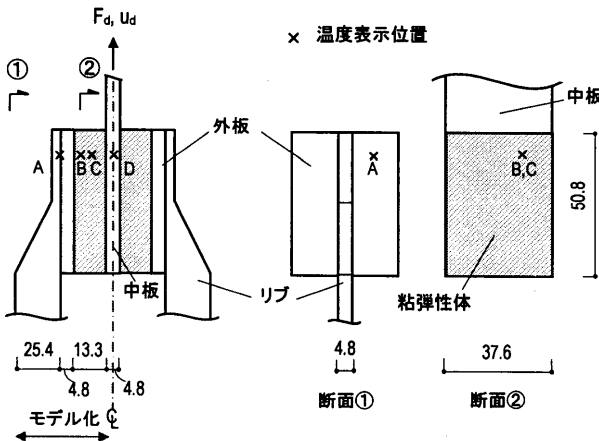


図6 解析対象ダンパーの概要および温度表示位置(単位:mm)

### 3. 長時間ランダム振動時のダンパー特性

#### 3.1 ダンパー内部温度の変化

はじめに、振幅 = 0.66cm, 振動数 = 0.33Hz, 継続時間 = 3000秒, ( $N_0^+ = 1,000$ )での正弦波振動による実験結果と長時応答解析法での解析結果を示す<sup>7)</sup>。正弦波での $\gamma_{eq}$ は50%である。なお、Window Time<sup>7)</sup>は入力正弦波周期の1.5倍とした。長時応答解析法の詳細および精度については文献7を参照されたい。また、数値積分にはL1アルゴリズムを用いた<sup>11)</sup>。図7より、開始直後は粘弾性体のエネルギー吸収による発熱のために温度が上昇するが、ある時点から熱伝導・伝達の効果により、温度が定常状態となることが分かる。

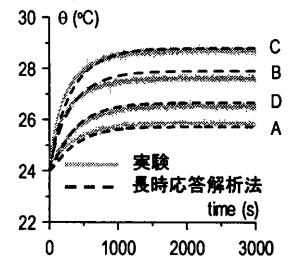


図7 正弦波振動での実験値と解析値の温度時刻歴の比較

次に、ランダム振動時のダンパー特性について検討を行う。ランダム波の場合でのWindow Timeは、ランダム波を作成した1質点モデルの固有周期の1.5倍とした。図8に風方向での解析より得られた温度時刻歴を、図9には風直角方向での温度時刻歴を示す。

図8, 9より、図7の正弦波の場合と同様に、ランダム振動においても、解析直後はエネルギー吸収による発熱によって温度が急激に上昇するが、ある時刻から多少の変動はあるものの、熱伝導・伝達の効果により温度がほぼ定常となることが確認できる。温度上昇量は、 $N_0^+$ (表1)が多いほど大きくなる。

図7の正弦波の場合と同じ標準偏差で、かつ最大振幅が正弦波より大きくても、 $N_0^+ = 1,000$ である図7での正弦波に比べ $N_0^+$ が少ないランダム振動時の温度上昇は低い結果となることが確認された。

図7の正弦波の場合と同じ標準偏差で、かつ最大振幅が正弦波より大きくても、 $N_0^+ = 1,000$ である図7での正弦波に比べ $N_0^+$ が少ないランダム振動時の温度上昇は低い結果となることが確認された。

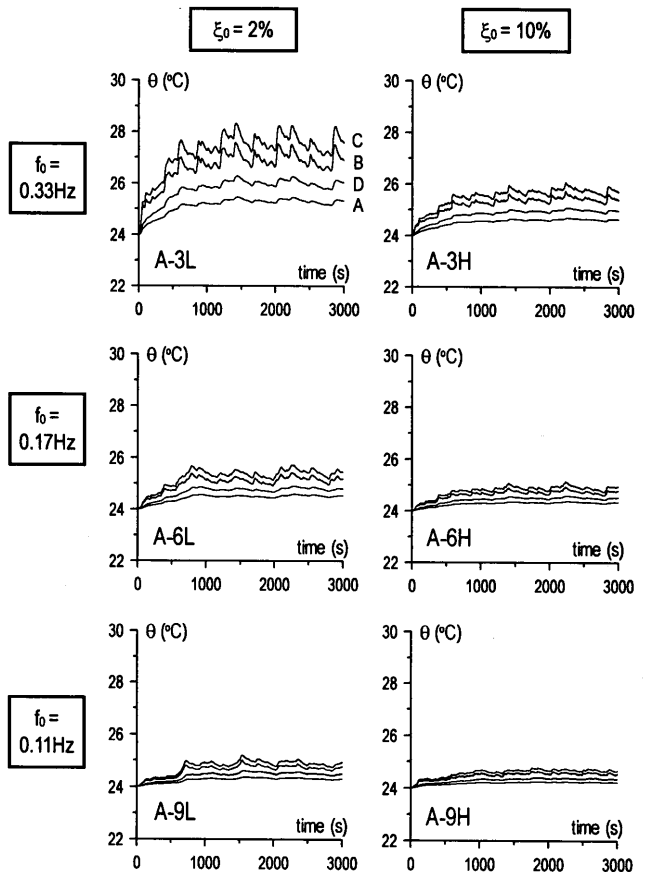


図8 風方向振動時の温度時刻歴

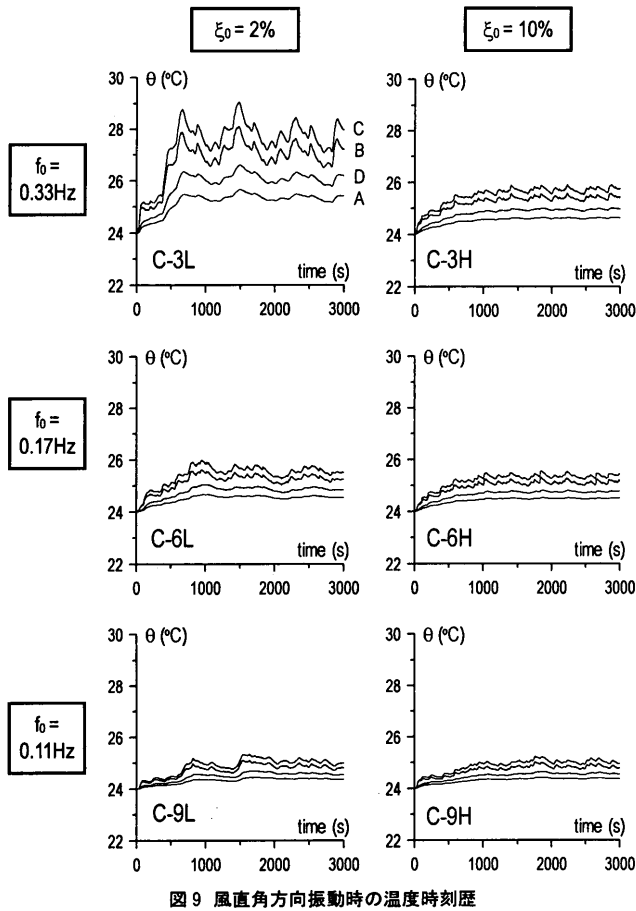


図9 風直角方向振動時の温度時刻歴

なお、粘弾性ダンパーの振動時の温度上昇は、ダンパー形状の影響を大きく受ける。筆者らは文献7において正弦波入力時での検討を行っている。参照されたい。

### 3. 2 貯蔵剛性および粘性係数の変化

図10に風方向での解析より得られたダンパー変形  $u_d$  -ダンパー力  $F_d$  の履歴を、図11には風直角方向での履歴を示す。それぞれの図において、0~1,000秒までの履歴と、2,000~3,000秒での履歴を重ねて示している。表2(a)に、ダンパー変形-ダンパー力の履歴から式(2a)の最小二乗法 (Least Square Method, LS) を用いて求めた風方向風力による風応答時のダンパーの等価な貯蔵剛性  $K'_{d,LS}$  を示す<sup>12)</sup>。また、表2(b)には、ダンパー変形を微分して算出したダンパー速度  $\dot{u}_d$  -ダンパー力  $F_d$  の履歴より、式(2b)の最小二乗法を用いて求めた風方向風力による応答時のダンパーの等価な粘性係数  $C'_{d,LS}$  を示す。それぞれの表において、0~1,000秒までの履歴と、2,000~3,000秒での履歴より求めた  $K'_{d,LS}$ ,  $C'_{d,LS}$  と、それぞれの比を示している。また同様に、表3(a), (b)には風直角方向風力による履歴 (図11) から求めた  $K'_{d,LS}$ ,  $C'_{d,LS}$  と、それぞれの比を示す。

$$K'_{d,LS} = \frac{n \sum u_{d,i} F_{d,i} - \sum u_{d,i} \sum F_{d,i}}{n \sum u_{d,i}^2 - (\sum u_{d,i})^2} \quad (2a)$$

$$C'_{d,LS} = \frac{n \sum \dot{u}_{d,i} F_{d,i} - \sum \dot{u}_{d,i} \sum F_{d,i}}{n \sum \dot{u}_{d,i}^2 - (\sum \dot{u}_{d,i})^2} \quad (2b)$$

ここに、 $\Sigma$ は総和記号で、履歴の  $n$  個の  $u_{d,i}$ ,  $F_{d,i}$  および  $\dot{u}_{d,i}$  を対象とする。

長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパーは、熱伝導・伝達の効果

により温度が定常となるため (図8, 9)、2,000~3,000秒での履歴より求めた  $K'_{d,LS}$ ,  $C'_{d,LS}$  は、0~1,000秒での履歴から求めた値と大きな違いは無く、最大でも  $K'_{d,LS}$  で0.955倍 (A-3L)、 $C'_{d,LS}$  では0.920倍 (A-3L) とダンパー特性の変化は小さいことが分かる。このような特性は、鋼材ダンパーなどの疲労のように剛性が低下し続ける特性とは異なり、粘弾性ダンパーの風制振への有用性を示すものである。

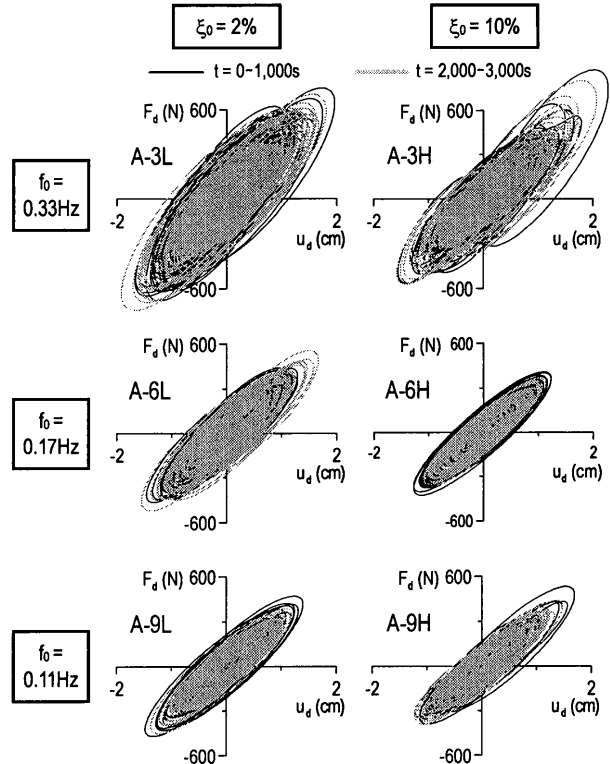


図10 風方向振動時のダンパー履歴

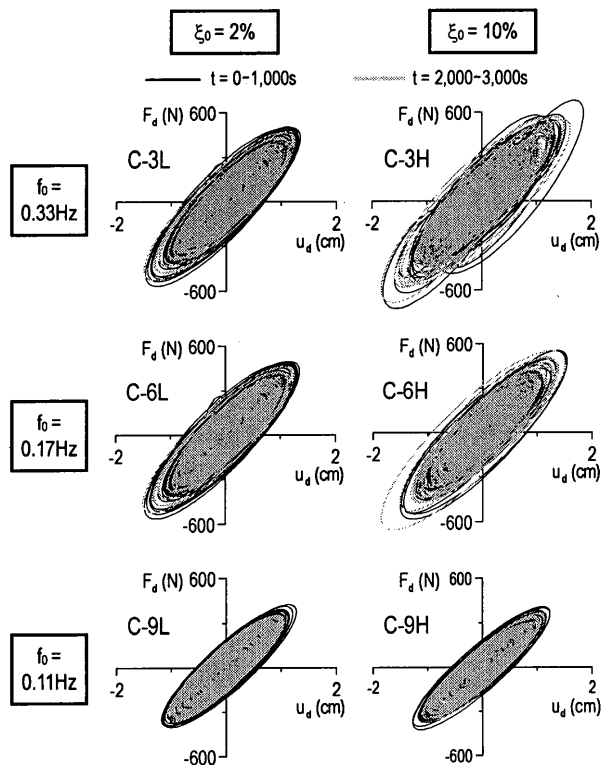


図11 風直角方向振動時のダンパー履歴

表2 風方向振動時のダンパー特性の変化

	$K'_{dLS}$ (N/cm)		$2,000\sim 3,000s$
	0~1,000s	2,000~3,000s	0~1,000s
(a) A-3L	343.13	327.62	0.955
A-3H	291.35	283.98	0.975
A-6L	305.87	299.66	0.980
A-6H	321.32	315.91	0.983
A-9L	291.38	288.09	0.989
A-9H	275.33	271.76	0.987

	$C'_{dLS}$ (N·s/cm)		$2,000\sim 3,000s$
	0~1,000s	2,000~3,000s	0~1,000s
(b) A-3L	140.69	129.38	0.920
A-3H	159.64	152.33	0.954
A-6L	202.50	195.90	0.967
A-6H	200.36	196.94	0.983
A-9L	242.92	238.24	0.981
A-9H	250.32	249.23	0.996

表3 風直角方向振動時のダンパー特性の変化

	$K'_{dLS}$ (N/cm)		$2,000\sim 3,000s$
	0~1,000s	2,000~3,000s	0~1,000s
(a) C-3L	324.25	318.55	0.982
C-3H	311.88	307.22	0.985
C-6L	321.32	315.91	0.983
C-6H	313.12	308.49	0.985
C-9L	302.18	298.38	0.987
C-9H	302.18	298.38	0.987

	$C'_{dLS}$ (N·s/cm)		$2,000\sim 3,000s$
	0~1,000s	2,000~3,000s	0~1,000s
(b) C-3L	201.55	198.57	0.985
C-3H	185.14	176.40	0.953
C-6L	200.36	196.94	0.983
C-6H	217.28	210.40	0.968
C-9L	239.87	233.38	0.973
C-9H	239.87	233.38	0.973

3. 3 漸増ランダム波入力での解析結果

次に、時間とともにダンパー変形の標準偏差が増大するランダム波（以下、漸増ランダム波）を入力とした場合について検討する。

図12に解析に用いた漸増ランダム波の時刻歴波形を示す。漸増ランダム波は3,000秒毎の3つのStageで構成されており、それぞれ $0.5\sigma_D$  (Stage1),  $0.75\sigma_D$  (Stage2),  $\sigma_D$  (Stage3)とダンパー変形の標準偏差が増大する。ここで、 $\sigma_D$ は先ほどと同様に $\sigma_D = 0.467$ であり、図12

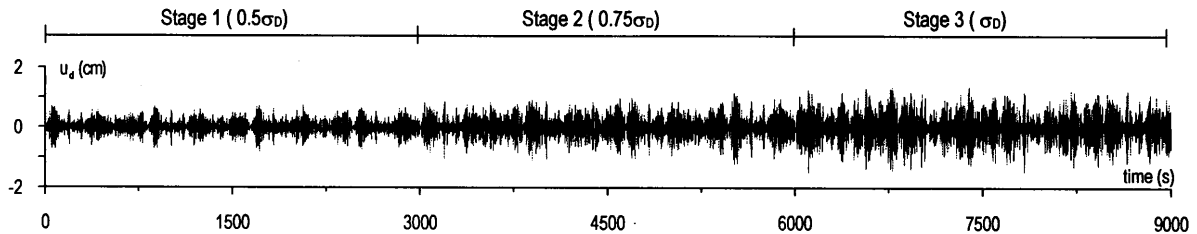


図12 漸増ランダム波時刻歴波形

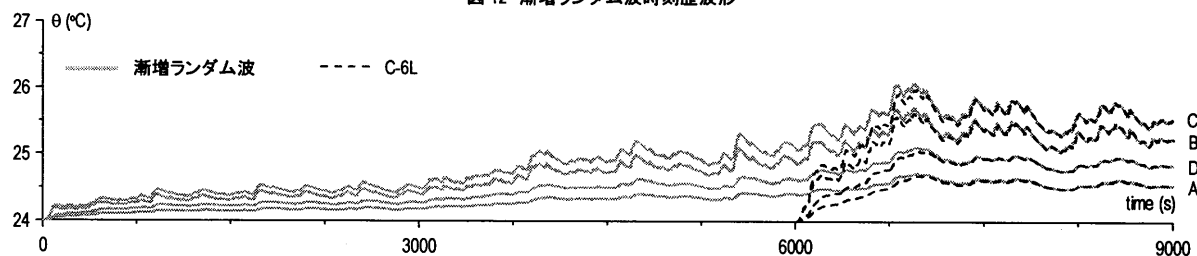


図13 漸増ランダム波での温度時刻歴

の Stage3 は、図5の C-6L と一致する。

図13は、漸増ランダム波を入力とした場合の解析より得られた温度時刻歴である。図13より、解析結果は、Stageが変化すると温度が上昇するが、その後は定常状態となることが分かる。また、図中には、図9の C-6L の時間軸をずらし、さらに縦軸を拡大して併記しているが、Stage3の後半部分の温度と一致していることが確認できる。これは、漸増ランダム振動においても、ある時刻から温度が定常状態となるため、初期条件の影響を受けないためである。つまり、漸増ランダム波のように応答が増大していくような外乱であっても振動による温度上昇量を評価する場合は、全ての時間を解析する必要はなく、最大応答となる入力に対し温度が定常となるまでの検討で十分であるといえる。

ただし、非定常性が強いランダム波をダンパー変形として用いた場合については温度が定常とならない可能性があると思われる。これについては今後の課題とする。

4. ランダム波の正弦波置換法

4. 1 正弦波置換法の目的と置換正弦波の設定方法

上述したように、長時応答解析法によりランダム波形での時刻歴解析を行うことで、ダンパー履歴を得ることが出来るが、その結果は、あるランダム波に対する特解であり、そこから長時間ランダム振動時のダンパー特性を包括的に把握することは難しい。また、ダンパー変形のランダム時刻歴波形を用いるため、風力の時刻歴波形を作成し、さらに時刻歴解析を行う必要があり、煩雑である。

第3章より、ダンパー変形の標準偏差 $\sigma_D$ 、繰返し数 $N_0$ および継続時間 $T_0$ が、長時間のランダム振動時における、粘弾性ダンパーの特性を決定する重要なパラメータとなることが分かった。本章では、ランダム波に内在するこれらのパラメータを、共通の振幅と振動数で表される正弦波に置換することで、様々なランダム波を用いることなく、正弦波のみでその特性を包括的に把握できる正弦波置換法を提案する。本手法は、風力の時刻歴波形の作成や応答解析を行う必要がないため非常に簡便である。さらに、これまで提案されている定常状態の理想化された理論や計算法などにつなげることが出来るため大変に有用である。また、本手法はこれまで行われてきた粘弾性ダンパーの長時間の正弦波加振試験の妥当性も示している。本章では、正弦波置換法について述べ、ランダム波入力での解析結果

と比較することで、正弦波置換法の精度検証を行う。

以下に、本手法について述べる。はじめに、風応答の簡易予測<sup>9)</sup>から変形の標準偏差 $\sigma_b$ およびゼロクロッシング数 $v_0^*$  (単位時間内に変形波形がゼロ軸を正の傾きで超える回数)が得られているとし、継続時間 $T_a$ を設定する。

ダンパー変形に用いる正弦波 (以下、置換正弦波)  $u_{d,r}(t)$ は、置換振幅 $A_r$ 、置換円振動数 $\omega_r (=2\pi f_r)$ を用いて次式のように表される。

$$u_{d,r}(t) = A_r \sin \omega_r t \quad (3)$$

長時間の振動による粘弾性体の耐久性などの確認にはダンパーの繰返し回数が重要となる。そこで、置換正弦波の置換振動数 $f_r$ は、ランダム波と置換正弦波で繰返し回数が等しくなるように決定する。つまり、 $f_r$ は $N_0^*$  および継続時間 $T_a$ を用いて次式より算出され、ゼロクロッシング数 $v_0^*$ で近似的に表すことができる。

$$f_r = N_0^* / T_a \approx v_0^* \quad (4)$$

また、置換正弦波は平均=0であり、その場合の時間に対する置換正弦波の分散 $\sigma_b^2$ は次式より求められる。

$$\sigma_b^2 = \frac{1}{T_a} \int_0^{T_a} (u_{d,r}(t))^2 dt = \frac{A_r^2}{2T_a} \left( \frac{\sin 2\omega_r T_a + 2\omega_r T_a}{2\omega_r} \right) \quad (5)$$

置換振幅 $A_r$ は、ランダム振動と置換正弦波でダンパー変形の $\sigma_b$ が等しくなるように決定する。つまり、上式を $A_r$ について整理し、 $\sin 2\omega_r T_a = 0$  ( $\because \omega_r = 2\pi N_0^* / T_a$ ) となることに注意すると、 $A_r$ は次式の如く表される。

$$A_r = \sqrt{2} \sigma_b \quad (6)$$

以上のようにして求めた12種類のランダム波 (表1) に対する、置換振幅 $A_r$ および置換振動数 $f_r$ を表4に示す。

表4 置換正弦波のパラメータ

		$T_a$ (s)	$A_r$ (cm)	$f_r$ (Hz)	$\omega_r$ (rad/s)
風方向	A-3L	3000	0.660	0.288	1.807
	A-3H			0.168	1.057
	A-6L			0.144	0.905
	A-6H			0.108	0.679
	A-9L			0.100	0.628
	A-9H			0.086	0.540
風直角方向	C-3L	3000	0.660	0.288	1.812
	C-3H			0.152	0.953
	C-6L			0.148	0.932
	C-6H			0.132	0.827
	C-9L			0.108	0.678
	C-9H			0.106	0.664

4.2 ランダム波と置換正弦波の比較

図14, 15に置換正弦波入力による解析より得られた温度時刻歴を、ランダム波入力での結果 (3.1節) と重ねて示す。なお、図14は風方向での結果、図15は風直角方向での結果である。図14, 15より、置換正弦波入力での温度時刻歴は、いずれの場合においても、ランダム波入力での結果と良い対応を示していることが確認できる。

表5(a)に、風方向での置換正弦波による解析より得られたダンパー変形—ダンパー力の履歴から、3.2節と同様に式(2a)の最小二乗法より求めたダンパー貯蔵剛性 $K'_{dLS}$ を示す。また、表5(b)にはダンパー変形を微分して算出したダンパー速度—ダンパー力の履歴におい

て、式(2b)より求めたダンパーの粘性係数 $C'_{dLS}$ を示す。それぞれの表において、0~1,000秒までの履歴と、2,000~3,000秒での履歴から求めた $K'_{dLS}$ 、 $C'_{dLS}$ およびそれぞれの比を示している。また、表6(a),(b)には風直角方向の置換正弦波での履歴から求めた $K'_{dLS}$ 、 $C'_{dLS}$ および、0~1,000秒までの履歴と、2,000~3,000秒での履歴から求めた $K'_{dLS}$ 、 $C'_{dLS}$ の比を示している。

表5, 6 (置換正弦波) そして表2, 3 (ランダム波) を比較して、様々な振動数成分を含むランダム波と異なり、正弦波置換法では、1つの振動数成分しか有しない正弦波を入力としているが、置換正弦波とランダム波での $K'_{dLS}$ 、 $C'_{dLS}$ は概ね一致していることが確認できる。また、0~1,000秒での $K'_{dLS}$ 、 $C'_{dLS}$ に対する2,000~3,000秒での低下の割合も、置換正弦波とランダム波でほぼ一致しており、本手法がランダム波入力でのダンパー特性だけでなく、長時間振動時の特性の変化も高精度で再現できることを確認した。

以上より、長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパー特性やその変化を、本手法により適切な振幅と振動数に設定した置換正弦波を用いることで、ランダム波形で加振するのではなく、これまでのように正弦波による加振試験でも、長時間のランダム振動時と等価なダンパー特性を評価できることを示した。よって、本手法は、ダンパーの加振試験においても有効な手法であるといえる。

文献7で提案した3次元有限要素解析による長時間振動時の粘弾性ダンパー特性を評価する手法は、ある温度での粘弾性体の特性を定常振動時の履歴を仮定して求めているため、ランダム振動時には計算することができなかった。しかし、本手法を用いて置換正弦波を入力と考えることにより、ランダム振動時のダンパー特性や3次元内的な内部温度の分布を得ることができる。

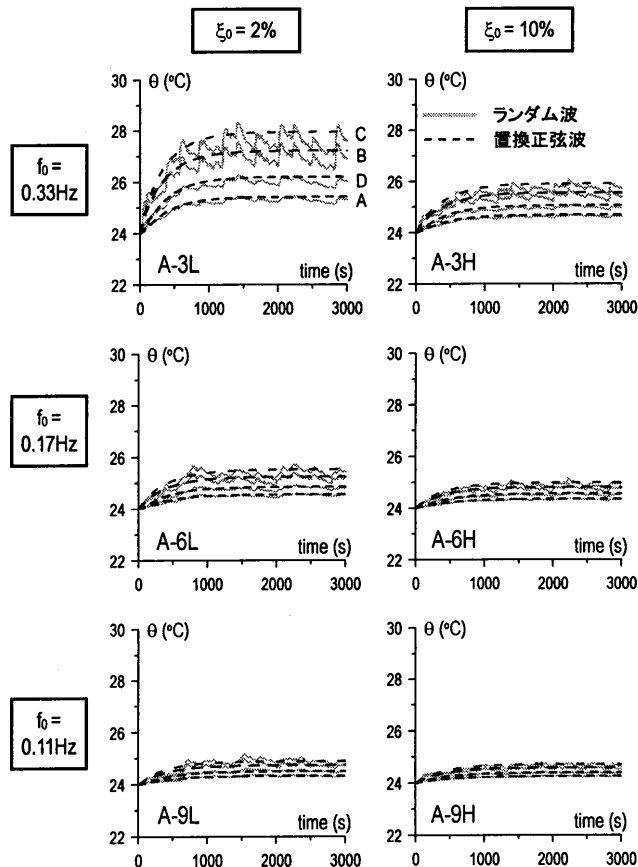


図14 風方向でのランダム波と置換正弦波の温度の比較

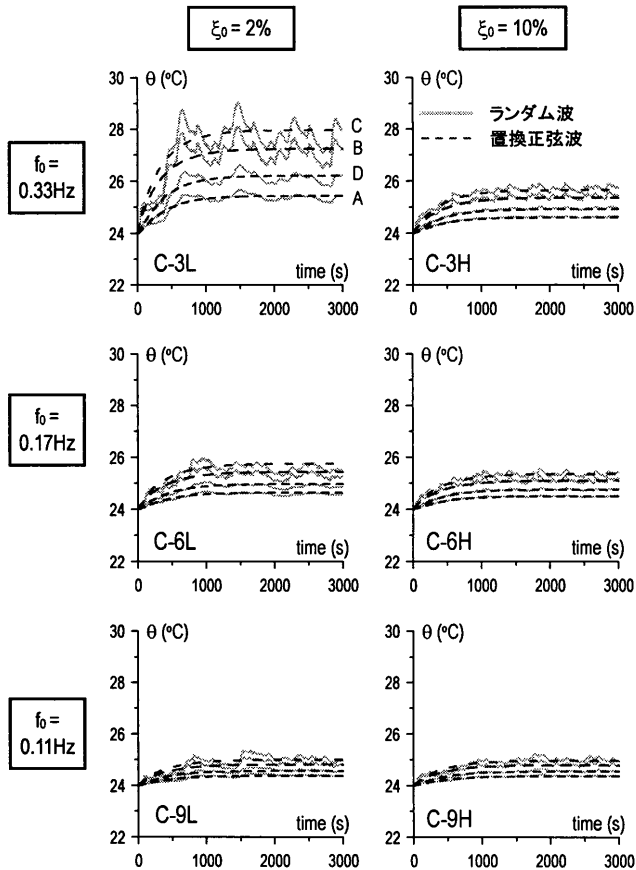


図 15 風直角方向でのランダム波と置換正弦波の温度の比較

5. おわりに

本論文では、特性の異なる 12 種類のランダム波と、応答が増大する漸増ランダム波を用いて、文献 7 で提案した長時応答解析法により、継続時間の長いランダム振動時の粘弾性ダンパーの特性の変化について検討を行った。さらに、ランダム波を用いずに、正弦波により長時間のランダム振動時のダンパー特性を評価する正弦波置換法を提案した。以下に結論を述べる。

- (1) 継続時間の長いランダム波の場合においても、ダンパー内部の温度は、多少の変動はあるものの、熱伝導・伝達の効果により、正弦波振動時と同様に温度が定常状態となることを確認した。
- (2) 漸増ランダム波形を入力とした場合でも、温度が定常状態となるため、ダンパーの最大温度の評価は、最大応答となる入力に対し温度が定常となるまでの検討で十分であることを示した。
- (3) 本論文で提案した正弦波置換法は、ダンパー変形のランダム時刻歴波形を作成する必要がなく簡便であり、ランダム振動時のダンパー特性を正弦波振動で精度良く評価できることを示し、これまで行われてきた正弦波加振試験による、長時間振動時のダンパー特性の評価についての妥当性も確認された。

本論文では入力として定常ランダム波を用いたが、今後は非定常なランダム波、特に台風のように風速に平均成分を有し、時間とともに風速が増大するような場合でのダンパー特性の変化や正弦波置換法の精度について検討を行う予定である。そのためには、ランダム振動時の熱伝達係数や、平均成分を有するダンパー変形がダンパー特性に与える影響について明らかにする必要がある。

表 5 置換正弦波(風方向)でのダンパー特性の変化

(a)

	K <sub>dLS</sub> (N/cm)		2,000~3,000s
	0~1,000s	2,000~3,000s	0~1,000s
A-3L	366.90	351.48	0.958
A-3H	328.54	321.92	0.980
A-6L	319.32	314.26	0.984
A-6H	300.80	297.90	0.990
A-9L	296.11	293.63	0.992
A-9H	287.32	285.52	0.994

(b)

	C <sub>dLS</sub> (N·s/cm)		2,000~3,000s
	0~1,000s	2,000~3,000s	0~1,000s
A-3L	145.37	132.97	0.915
A-3H	196.02	186.91	0.954
A-6L	212.09	204.01	0.962
A-6H	242.53	236.37	0.975
A-9L	251.03	245.34	0.977
A-9H	268.16	263.35	0.982

表 6 置換正弦波(風直角方向)でのダンパー特性の変化

(a)

	K <sub>dLS</sub> (N/cm)		2,000~3,000s
	0~1,000s	2,000~3,000s	0~1,000s
C-3L	366.9	351.48	0.958
C-3H	323.05	317.46	0.983
C-6L	321.14	315.82	0.983
C-6H	313.62	309.32	0.986
C-9L	300.80	297.90	0.990
C-9H	299.69	296.89	0.991

(b)

	C <sub>dLS</sub> (N·s/cm)		2,000~3,000s
	0~1,000s	2,000~3,000s	0~1,000s
C-3L	145.37	132.97	0.915
C-3H	206.57	198.12	0.959
C-6L	209.28	201.02	0.961
C-6H	221.09	213.61	0.966
C-9L	242.53	236.37	0.975
C-9H	244.58	238.53	0.975

参考文献

- 1) 日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能評価指針・解説書, 丸善, 2004.5
- 2) (社)日本免震構造協会: パッシブ制振構造設計・施工マニュアル, 第1版, 2003.10, 第2版, 2005.9
- 3) 東京工業大学建築物理センター: パッシブ制振構造シンポジウム 2000~2004, 2000.3, 2001.12, 2002.12, 2004.11
- 4) 笠井和彦: 粘弾性材料—建物制振への適用, 未来材料, 2(3), pp.42-47, 2002.3
- 5) Ferry, J.D.: Viscoelastic Properties of Polymers, John Wiley & Sons Inc., Third Ed., New York, 1980
- 6) 曾田五月也, 和田純一, 平田裕一, 山中久幸: 繰返加力実験にもとづく粘弾性ダンパーの力学モデルの構築, 日本建築学会構造系論文集, 第 457 号, pp.29-36, 1994.3
- 7) 笠井和彦, 佐藤大樹, 黄一華: 継続時間が長い外乱での温度上昇と熱伝導・伝達を考慮した粘弾性ダンパーの解析手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 599 号, pp.61-69, 2006.1
- 8) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 丸善, 2004.9
- 9) 岩谷祥美: 任意のパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元の風速変動のシミュレーション, 日本風工学会研究會誌, 第 11 号, pp.5-18, 1982.1
- 10) J.P.ホールマン: 伝熱工学 (上), ブレイン図書出版, 1993
- 11) 笠井和彦, 佐藤大樹: 粘弾性ダンパー—分数微分構成則の高速化計算アルゴリズム, 日本建築学会構造系論文集, 第 606 号, pp.113-121, 2006.8
- 12) 大木洋司, 笠井和彦, 高橋治: 微小振幅における速度依存ダンパーの性能について, 構造工学論文集, Vol.50B, pp.601-609, 2004.3