

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	風応答振動時における粘弾性ダンパーの特性および正弦波による簡易評価手法
Title(English)	PROPERTIES OF VISCOELASTIC DAMPER UNDER WIND-INDUCED EXCITATION AND SIMPLIFIED EVALUATION METHOD USING SINUSOIDAL-WAVE
著者(和文)	佐藤大樹, 所健, 笠井和彦, 北村春幸
Authors(English)	Daiki Sato, Ken Tokoro, KAZUHIKO KASAI, Haruyuki Kitamura
出典(和文)	日本建築学会構造系論文集, Vol. 80, No. 710, pp. 571-581
Citation(English)	Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 80, No. 710, pp. 571-581
発行日 / Pub. date	2015, 4
Rights	日本建築学会
Relation	is version of: https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijs/80/710/80_571/_article/-char/ja/
Note	本文データは学協会の許諾に基づきJ-STAGEから複製したものである

風応答振動時における粘弾性ダンパーの特性および正弦波による簡易評価手法

PROPERTIES OF VISCOELASTIC DAMPER UNDER WIND-INDUCED
EXCITATION AND SIMPLIFIED EVALUATION METHOD USING SINUSOIDAL-WAVE佐藤大樹^{*1}, 所 健^{*2}, 笠井和彦^{*3}, 北村春幸^{*4}*Daiki SATO, Ken TOKORO, Kazuhiko KASAI
and Haruyuki KITAMURA*

Viscoelastic damper dissipates energy through shear deformation of the viscoelastic material, and it causes temperature rise resulting softening of the material under long duration loading. This paper discusses properties of viscoelastic damper during long duration wind-induced vibration and presents simplified evaluation method using sinusoidal-wave as a substitute to random time history data properties. Accuracy of this evaluation method is validated by comparing the random vibration tests to sinusoidal-wave tests. In addition, analysis method of viscoelastic constitutive rule, which is based on fractional time-derivative model that takes heat transfer analysis into consideration, is used under long duration wind-induced vibration to simulate viscoelastic damper properties such as temperature dependence, stiffness, and etc. Analytical results are consistent with random vibration test results using heat-transfer coefficient obtained from simplified sinusoidal-wave test.

Keywords : *Viscoelastic Damper, Temperature Sensitivity, Frequency Sensitivity, Wind-induced Excitation, Simplified Evaluation Method, Heat Transfer*

粘弾性ダンパー, 温度依存, 振動数依存, 風応答振動, 簡易評価法, 熱伝達

1. はじめに

1.1 研究背景

建物の高層化に伴う風力の増大によって, 超高層建物は地震時の安全性だけでなく, 強風時の居住性も重視されるようになってきている。風によって振動が発生すると, 超高層建物の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¹⁾。上記の問題を解決する方法として, 大地震から風の振動まで有効に機能する粘弾性ダンパーを用いた制振構造が挙げられる^{2),3)}。

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⁴⁾。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⁵⁾, 笠井ら⁶⁾などにより長時間の正弦波による粘弾性ダンパー単体での強制変位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・伝達の効果によってある時点で温度が定常状態になるため, 長時間の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に漸近することが確認されている。ただし, 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様々な周波数を有する長時間のランダム波を入力とした際のダンパー温度変化を評価する実験は僅かである^例えば⁷⁾。粘弾性ダンパーは振動数依存性も有するため, 風応答時の粘弾性ダンパーの特性は, 風の特性, 建物の固有振動数, ダンパー量などによって複雑に変化し⁸⁾⁻¹¹⁾, それに伴い粘弾性体のエネルギー吸収による発熱量も変化する。そのため, 様々な振動数成分を有する長時間風応答時の粘弾性ダンパー特性を, 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

筆者らは, 正弦波を用いて風応答時におけるダンパー特性の変化を評価できる手法(正弦波置換法)を提案している¹²⁾。そこでは, エネルギー吸収に伴い発生した熱の伝導や伝達の効果を, 粘弾性ダンパーの振動数依存性を精度良く再現できる分数微分構成則¹³⁾に組み込んだ時刻歴解析手法(以降, 長時応答解析法⁶⁾と呼ぶ)を用いた解析的検討のみに留まっていた¹⁴⁾。さらに, 長時応答解析法は風

^{*1} 東京工業大学建築物理研究センター 准教授・博士(工学)

^{*2} スリーエム ジャパン(株) マネジャー・修士(工学)

^{*3} 東京工業大学建築物理研究センター 教授・Ph.D.

^{*4} 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Structural Eng. Research Center, Tokyo Institute of Tech., Dr. Eng.

Manager, 3M Japan Limited, M. Eng.

Prof., Structural Eng. Research Center, Tokyo Institute of Tech., Ph. D.

Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

応時のようなランダム振動での実験との検証が十分に行われていなかった。

そこで本論文の目的は、長時間の風応答を模擬したランダム加振実験を行い、粘弾性ダンパーの特性の変化を検討するとともに、正弦波置換法の実験方法としての有用性を確認することである。加えて、ランダム振動時における長時応答解析法の精度も検証する。

以下に、本論文の構成を述べる。2 章では長時間ランダム加振実験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を述べ、粘弾性ダンパーおよび計測の概要について述べる。また、ランダム加振実験結果からダンパーの内部温度やダンパー特性の変化について検討する。3 章では、正弦波置換法について概説し、ランダム波での実験結果とダンパー特性を比較することで、正弦波置換法の妥当性を示す。4 章では、長時応答解析法での時刻歴解析を行い、ランダムおよび正弦波実験結果と比較することで本解析手法の精度を確認する。

2. 長時間ランダム加振実験

2.1 ダンパーおよび計測の概要

本実験に用いる粘弾性ダンパーは Fig.1 に示すように、2 層のアクリル系粘弾性体材料（3M Japan 製 ISD111）¹³⁾ を厚さ $d_s = 12$ mm 鋼材の中板・外板の間に挟んだ両面せん断型である。粘弾性体の幅と長さはそれぞれ $B = 80$ mm, $L = 160$ mm (せん断面積 $A_s = 25,600$ mm²)、厚さ $d_v = 16$ mm である。

粘弾性ダンパーの温度は、Fig.1 に示すように、外板の外気側（A 点）、粘弾性体上側の厚さ方向の 1/4（B, F 点）と 1/2（C, E 点）の位置、そして中板の厚さの中心（D, G 点）の計測を行う。また、ダンパーの周辺温度（H 点）も測定する。温度の測定には熱電対を用いた。温度計測の時間刻みは、 $\Delta t = 1.0$ 秒で加振開始から実験終了まで連続で測定した。ダンパーの荷重と変位の計測の時間刻みは、後述する置換正弦波において、最も振動数が高い A-3L および C-3L 実験時に 1 サイクル当たり 300 点以上を計測できるように $\Delta t = 0.01$ 秒で行った。ただし、計測を行う機器の記憶容量の制約上、全時間における連続計測は不可能であったため、200 秒ごとに置換正弦波の 5 サイクルに対応する時間で、60 回繰り返して測定した。ダンパーの周辺温度の変化による影響を極力避けるため、実験は、一定温度が保たれる容器内で行い、さらに周辺温度が加振終了まで常に 24 °C となるよう調整を行った。

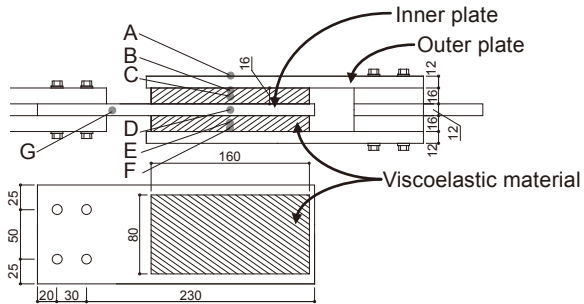


Fig.1 Test specimen & temperature measurement positions (unit : mm)

2.2 風力の作成方法

本論文では、高さ 200 m、幅・奥行きが等しく高さ 50 m の超高層

建物を想定した^{10),11)}。文献 15)に基づき、再現期間 500 年、粗度区分をⅢ（頂部設計風速 $U_H = 60.79$ m/s）として設定したパワースペクトル密度（PSD）と一致するように、819.2 秒間の風方向および風直交方向の層風力時刻歴波形を、高さ方向の位相と相関を考慮して AR 法¹⁶⁾により複数作成した¹⁰⁾。風応答は 1 次モードが卓越するため¹⁷⁾、現状の耐風設計では 1 次モード応答に着目した手法が採用されている¹⁵⁾。そのため、本論文においても現状での耐風設計に合わせ、1 次モード応答を用いた検討を行う。なお、高次モードの影響を考慮した検討は別報にて報告する予定である。

建物の 1 次モードを直線と仮定して層風力時刻歴波形から風方向および風直交方向の 1 次モーダル風力波形を作成した。作成した 1 次モーダル風力の PSD S_F の一例を Fig.2 に示す。なお、Fig.2 の縦軸は、振動数 f および風方向・風直交方向風力の PSD の面積から得られる分散 σ_F^2 を用いてそれぞれの S_F を無次元化している。また、図中の 2 本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、 $f_0 = 0.17, 0.33$ Hz）を表している。Fig.2 より、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、風直交方向の 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ことが確認できる。

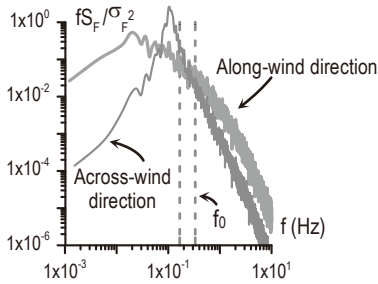


Fig.2 PSD of 1st modal wind force

2.3 ランダム波の作成および振動数特性

本論文では、固有周期 $T_0 = 3$ 秒と 6 秒（ $f_0 = 0.33, 0.17$ Hz）について、それぞれ減衰定数 ξ_0 を 2%, 10% とした合計 4 種の 1 質点モデルを用いた。前節で作成した複数の風方向の 1 次モーダル風力波形による 1 方向の時刻歴応答解析を行った。その際、時間刻み $\Delta t = 0.01$ 秒とした。その後、得られた複数の変形時刻歴波形を 3,000 秒となるように、風方向での解析結果をつなぎ合わせた。一般に、風応答の予測や評価を行う場合は標準偏差が用いられる^{7-11),15)}。本実験では標準偏差が等しいという条件下で実験を行うことで、長時間ランダム振動時における粘弾性ダンパーの特性変化に影響を与えるパラ

Table1 Damper deformation (Random)

Case	u_d Max (mm)	u_d Min (mm)	σ_u (mm)	P.F.	N_0^+
A-3L	21.0	-20.6	5.0	4.2	3,452
A-3H	24.4	-16.9		4.9	2,018
A-6L	17.9	-16.6		3.6	1,728
A-6H	23.3	-16.2		4.7	1,296
C-3L	17.9	-17.4	5.0	3.6	3,460
C-3H	19.9	-19.6		4.0	1,820
C-6L	14.7	-16.0		3.2	1,780
C-6H	17.1	-20.4		4.1	1,580

メータを検討する。ここでは、実験時におけるダンパー変形の標準偏差が $\sigma_u = 5.0 \text{ mm}$ となるように基準化した。風直交方向についても同じ方法で、 $\sigma_u = 5.0 \text{ mm}$ となる3,000秒のダンパー変位を作成した。

本実験では、ランダム加振を行う機器の記憶容量の制約により、3,000秒の変位時刻歴波形を装置に記憶させ、それを連続で4回繰り返すことによって、継続時間が12,000秒となる1軸方向の連続加

振を行った。なお、風方向風力は平均成分を有するが⁹⁾¹¹⁾、本論文では、研究の初期段階として変動成分のみを用いることとした。平均成分の影響については今後検討を行う予定である。

ランダム波強制変位加振実験に用いたダンパー変形の統計値をTable1に示す。ここで、表中のA：風方向、C：風直交方向、L：低減衰($\xi_0 = 2\%$)、H：高減衰($\xi_0 = 10\%$)であり、数字は1質点モデルの固有周期 T_0 を意味する。また、P.F.：ピークファクター(=最大値/標準偏差)、 N_0^+ ：12,000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。本実験に用いたアクリル系粘弾性体は線形性が強く、ダンパーの最大変形 $u_d \text{Max}$ は、本実験の振動数・温度において概ね線形と見なせる範囲である¹⁸⁾。なお、この値は通常の設計範囲(粘弾性体のせん断歪み300%以下²⁾)に対して約半分の値で、階高を4mとした場合、層間変形角 $R = 1/200 \sim 1/100$ 程度に相当する。

Fig.3に、風方向および風直交方向でのダンパー変形の無次元PSDを示す。Fig.3の縦軸はFig.2と同様に、ダンパー変形のPSD S_u 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 σ_u^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。Fig.4(a), (b)に風方向および風直交方向でのダンパー変形 u_d の時刻歴波形を示す。なお、Fig.A1にはA-3HおよびC-6Lのダンパー変位時刻歴の拡大図を示す。Fig.3の風方向のPSDより、 $\xi_0 = 2\%$ のPSD(A-3L, A-6L)は、減衰が小さいため固有振動数成分が卓越した形状となっていることが確認できる。ただし、風方向の

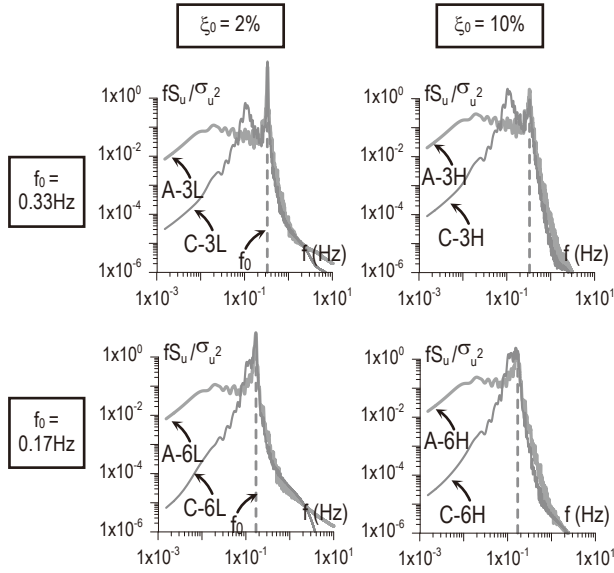
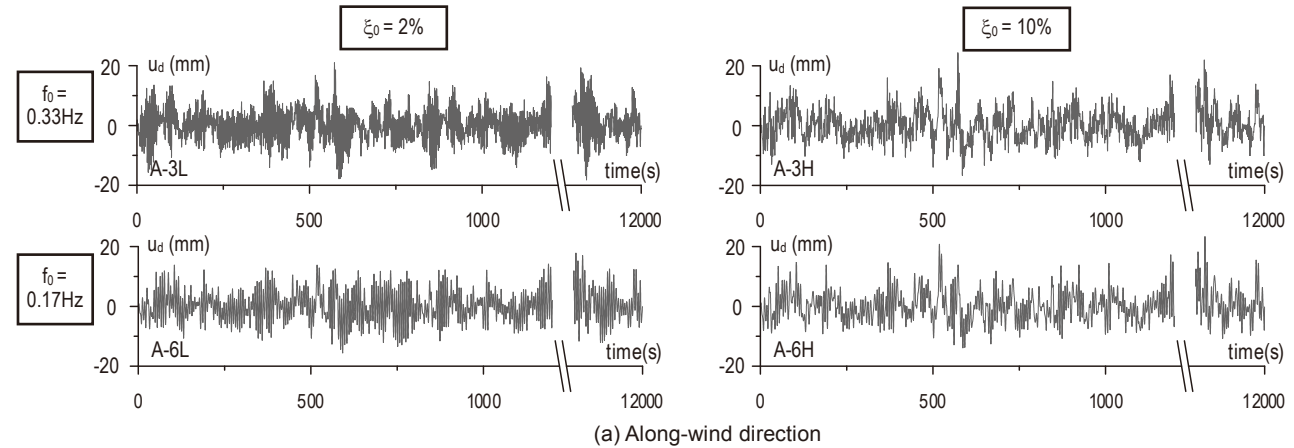
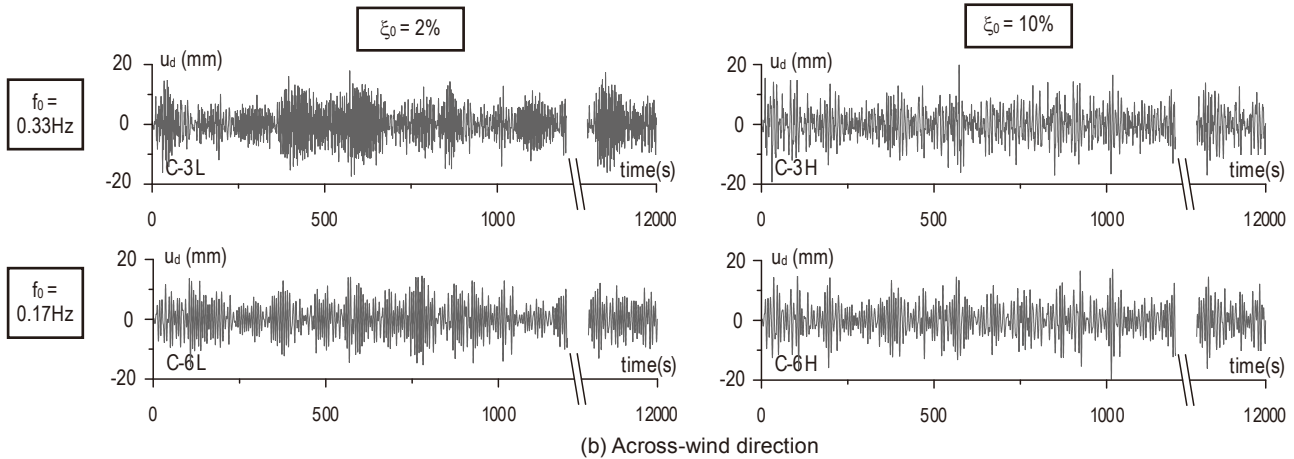


Fig.3 PSD of damper deformation



(a) Along-wind direction

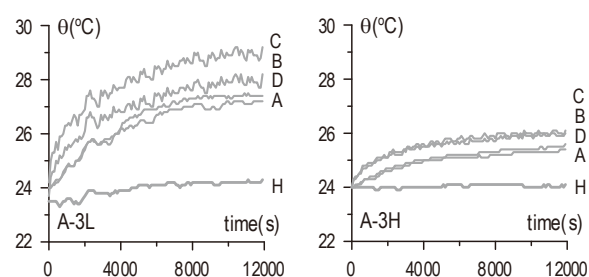


(b) Across-wind direction

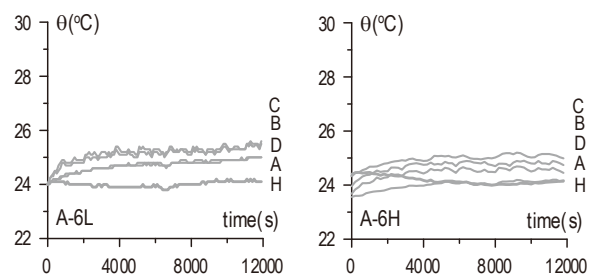
Fig.4 Time history of damper deformation

風力は1質点モデルの固有振動数 f_0 に比べ低振動数側にパワーを有するため (Fig.2), 固有振動数成分だけでなく低振動数成分も多く含まれていることが, PSD だけでなく Fig.4(a)および Fig.A1 の時刻歴波形からも分かる。一方, $\xi_0 = 10\%$ でのダンパー変形の PSD (A-3H, A-6H) は, 減衰が大きいため固有振動数成分が少なくなり, 風力による低振動数成分が相対的に多くなっていることが確認できる。そのため, Fig.4(a)のダンパー変形波形は低振動数成分を多く含む波形となり, P.F.も大きな値となっていることが Table1 より確認できる。

風直交方向の風力 PSD (Fig.2) は, 固有振動数付近に狭帯域なピークを有する形状であるので, ダンパー変形の PSD も風方向に比べると狭帯域な形状となる。特に $T_0 = 6$ 秒のモデルでは, 固有振動数 ($f_0 = 0.17$ Hz) が風力の PSD のピークに近いために, 減衰の小さい $\xi_0 = 2\%$ の C-6L の PSD は最も狭帯域な形状となっていることが Fig.3 および Fig.A1 より確認できる。そのため, C-6L の P.F.は最も小さい値となっている (Table1)。



(a) Along-wind direction



(b) Across-wind direction

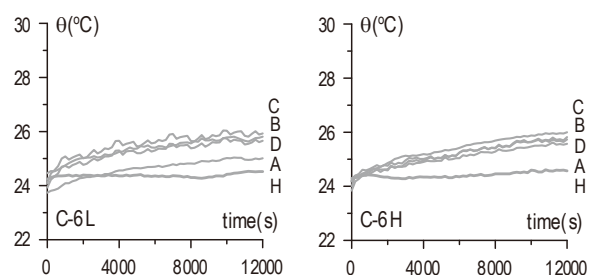
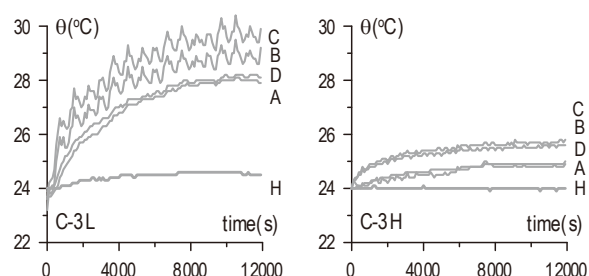
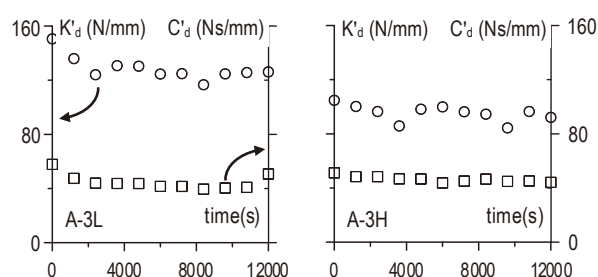


Fig.5 Damper temperature of random vibration tests

2.4 ダンパー内部温度の変化

Fig.5(a)に風方向入力での実験より得られた温度時刻歴を, Fig.5(b)には風直交方向入力での実験より得られた温度時刻歴を示す。それぞれの図において, 上から順に C, B, D, A 点 (Fig.1) および周辺温度 H 点位置での結果である。Fig.5(a), (b)より, いずれのケースにおいてもダンパー中心である C 点がかっとも高い温度となっていることが確認できる。本実験ではダンパー変形の標準偏差が等しくなるように基準化しているダンパー変形波形を用いて加振を行っているが, 温度上昇量は最大変形ではなく, N_0^+ (Table1) が多いほど大きくなることが分かる。温度上昇の変化を見ると, いずれの加振においても, 加振直後は粘弾性体のエネルギー吸収による発熱によってダンパー内部の温度が急激に上昇するが, ある時刻から熱伝導・伝達の効果により温度上昇が鈍くなり, 温度がほぼ一定値に漸近する傾向が確認できる。ただし, 温度がほぼ一定値に漸近するまでに要する時間は入力によって異なることも分かる。



(a) Along-wind direction

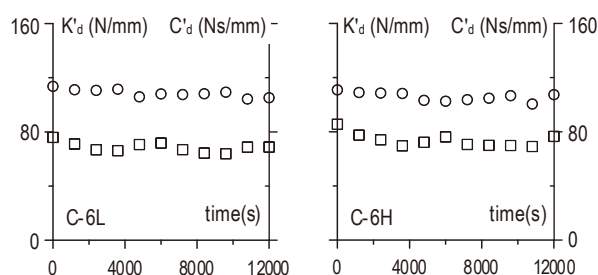
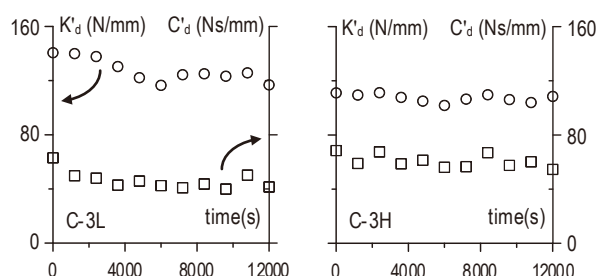
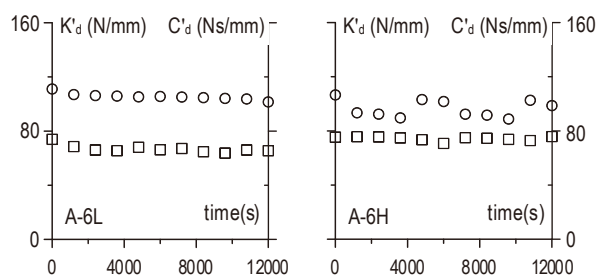


Fig.6 K'_d & C'_d of random vibration tests

2.5 貯蔵剛性および粘性係数の変化

本節では、ランダム振動時におけるダンパーの動的特性である貯蔵剛性 K'_d と粘性係数 C_d の時間変化について検討する。Fig.6(a), (b) にランダム波による実験における、貯蔵剛性 K'_d と粘性係数 C_d の時間変化を示す。 K'_d はダンパー変形 u_d - ダンパー荷重 F_d の履歴ループの傾きを表し、式(1a)の最小二乗法によって算出できる¹⁹⁾。また、風応答時のダンパーの等価な粘性係数 C_d はダンパー変形を微分して算出したダンパー速度 $\dot{u}_d$ - ダンパー荷重 F_d の履歴ループの傾きを意味し、式(1b)の最小二乗法により求められる¹²⁾。

$$K'_d = \frac{n \sum u_d^{(i)} \cdot F_d^{(i)} - \sum u_d^{(i)} \sum F_d^{(i)}}{n \sum (u_d^{(i)})^2 - (\sum u_d^{(i)})^2} \quad (1a)$$

$$C_d = \frac{n \sum \dot{u}_d^{(i)} F_d^{(i)} - \sum \dot{u}_d^{(i)} \sum F_d^{(i)}}{n \sum (\dot{u}_d^{(i)})^2 - (\sum \dot{u}_d^{(i)})^2} \quad (1b)$$

ここで、 Σ は総和記号で、 n 個の $u_d^{(i)}$ または $\dot{u}_d^{(i)}$ と $F_d^{(i)}$ を対象とする。貯蔵剛性、粘性係数共に、200 秒毎に後述する置換正弦波の 5 サイクルに対応する時間で計測した履歴から算出している。Fig.6(a), (b) には代表値として、1,200 秒ごとの履歴から算出した値を示している。Fig.6(a), (b) より、加振開始からダンパー特性が大きく低下せず、ある時刻から K'_d 、 C_d が一定値に収束していることが確認できる。これは、Fig.5(a), (b) から、ランダム波による加振において温度が上昇し続けることなく一定値に漸近したためである。このような特性は、鋼材ダンパーなどの金属の疲労のように剛性や耐力が低下し続けるものとは異なり、継続時間の長い風制振への粘弾性ダンパーの有用性を示すものである。

3. 正弦波による簡易実験手法

3.1 正弦波置換法

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、あるランダム波が特定の建物に作用した場合の特解であり、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、さらに時刻応答解析を行う必要があり非常に煩雑である。粘弾性ダンパーの動的特性を評価するためには、これまで一般的に行われてきた一定振幅・振動数による実験方法が有用であり、振幅・振動数を決定するために正弦波置換法を用いる。

ダンパー変形の標準偏差 σ_u 、繰返し数 N_0^+ および継続時間 t_a 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ている^{9),11)}。そこで文献¹²⁾において、ランダム波に内在するこれらのパラメータを、一定の振幅と振動数で表される正弦波に置換する手法を提案した。本手法は、風力の時刻歴波形を作成および応答解析を行う必要がないため非常に簡便であるだけでなく、従来行われてきた正弦波による強制変位加振実験結果を用いて評価することもできる。さらに、これまで提案されている定常振動の理想化された理論や計算法などにつなげることができるなどの利点も有する。本章では、正弦波置換法について概説し、ランダム波入力での実験結果と比較することで本手法の

妥当性を検証する。

以下に、正弦波置換法による正弦波の作成方法¹²⁾について述べる。予条件として、風応答の簡易予測^{例えば^{11),15)}}から、変形の標準偏差 σ_u および繰返し数 N_0^+ が得られているとする。粘弾性ダンパーは振動数依存性を有するため、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。また、置換振幅 A_r は、ランダム波と置換正弦波でダンパー変形の σ_u が等しくなるように決定する。つまり、置換振動数 f_r および置換振幅 A_r は、ランダム振動時のダンパー変形の繰返し数 N_0^+ 、継続時間 t_a および標準偏差 σ_u を用いて次式より算出される¹²⁾。

$$f_r = N_0^+ / t_a, \quad A_r = \sqrt{2} \sigma_u \quad (2a, b)$$

なお、式(2b)の $\sqrt{2}$ は正弦波における理論値の P.F. を意味する。以上のようにして求めた 8 種類のランダム波 (Table 1) に対する、置換振幅 A_r および置換振動数 f_r を Table 2 に示す。

Table2 Damper deformation (Sinusoidal)

Case	t_a (s)	A_r (mm)	f_r (Hz)	$\dot{u}_d$ Max (mm/s)
A-3L	12,000	7.07	0.288	12.79
A-3H			0.168	7.46
A-6L			0.144	6.40
A-6H			0.108	4.80
C-3L	12,000	7.07	0.288	12.79
C-3H			0.152	6.75
C-6L			0.148	6.57
C-6H			0.132	5.86

3.2 ランダム波加振実験と置換正弦波加振実験の比較

Fig.7(a), (b) に置換正弦波による実験により得られた A~D, H 点における温度時刻歴をランダム波実験の結果に重ねて示す。Fig.7(a) は風方向での結果、Fig.7(b) は風直交方向での結果である。なお、置換正弦波実験もランダム波実験と同様に、一定温度が保たれる容器内で行い、周辺温度は加振終了までの間、常に 24 °C となるよう維持して行った。Fig.7(a), (b) より、置換正弦波加振での温度時刻歴は、C-3L や C-6L のように置換正弦波実験とランダム波実験での周辺温度 (H 点) の違いによって、鋼材の温度である A 点や D 点で多少の違いは見られるものの、粘弾性ダンパーの特性に影響を及ぼす粘弾性体の温度 (C, D 点) は、置換正弦波とランダム波実験の結果で良い対応を示していることが確認できる。

Fig.8(a), (b) にランダム波と置換正弦波による実験により得られた、貯蔵剛性 K'_d と粘性係数 C_d の時間変化を重ねて示す。置換正弦波実験より得られた K'_d および C_d も前節までと同様に、1200 秒ごとに取り出した履歴から式(1a), (1b)より算出している。

Fig.8(a), (b) から、様々な振動数成分を有するランダム波とは異なり、正弦波は 1 つの振動数成分しか有していないものの、正弦波置換法によって決定した振幅と振動数を用いることで、置換正弦波より得られた K'_d 、 C_d はランダム波の結果と良く一致していることが分かる。ただし、Fig.8(a) の A-3H 実験での K'_d および C_d が、ランダム波実験と置換正弦波実験で誤差が大きいことが確認できる。これは風力の準静的成分の影響¹⁷⁾によるものと考えられる。Fig.9(a), (b)

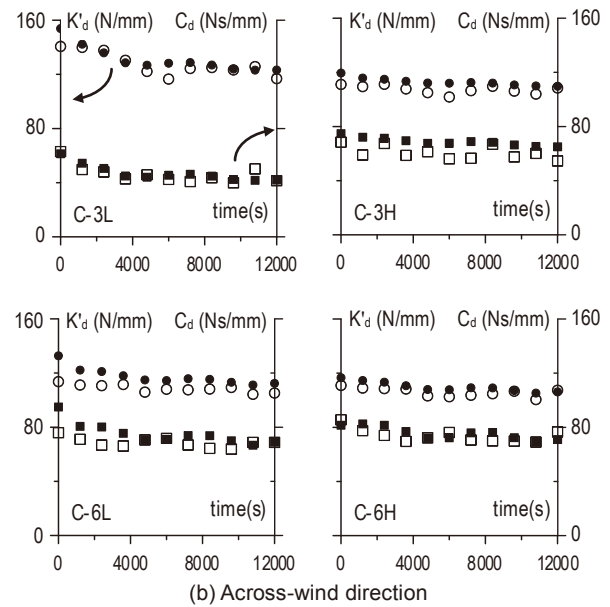
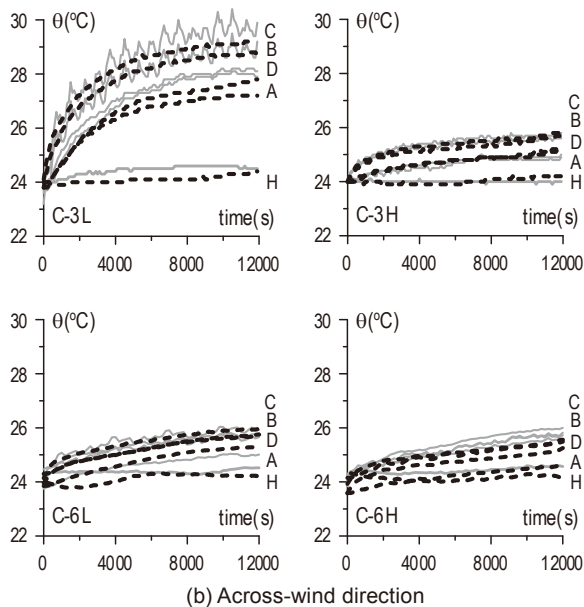
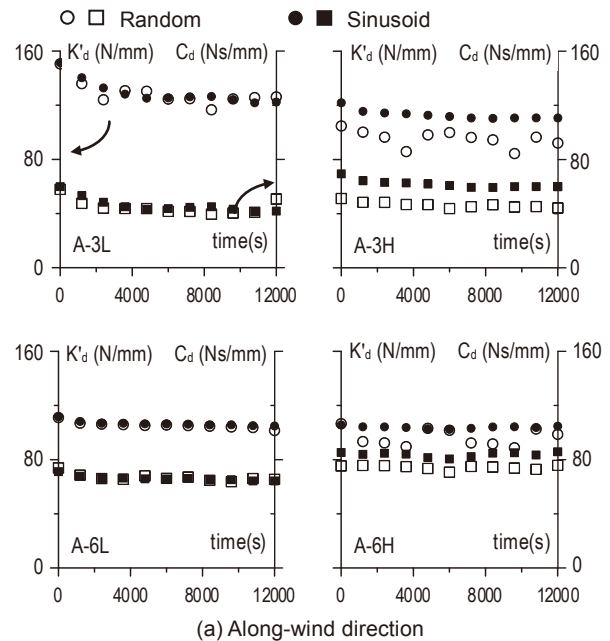
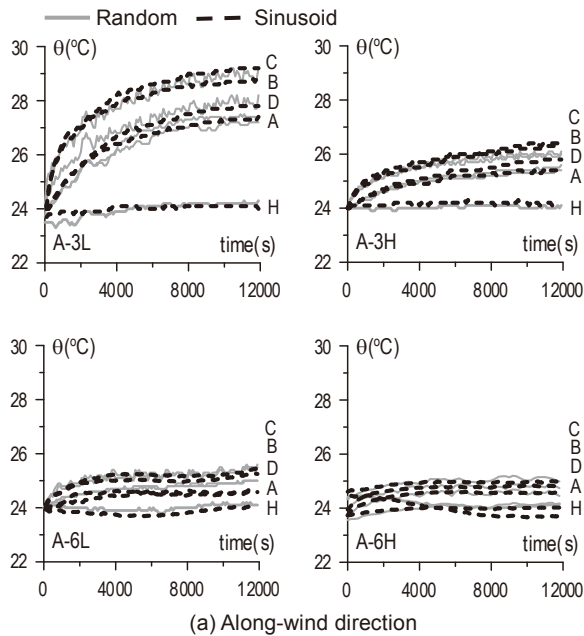


Fig.7 Random VS. sinusoidal tests of temperature

Fig.8 Random VS. sinusoidal tests of K'_d & C_d

に A-3H 実験の 3600 秒から 90 秒間の履歴をランダム波と置換正弦波実験で並べて示している。Fig.9(a)のランダム波実験の履歴より、履歴の中心位置がシフトしていることが確認できる。風力の準静的成分は風方向に多く含まれる (Fig.2)。そのため Fig.3 や Fig.4(a)からも分かるように、風方向のダンパー変位には準静的成分が多く含まれた波形となる。さらに、準静的成分は建物の減衰によって殆ど変化しない値であるため¹⁷⁾、固有振動数成分の少ない減衰の高い建物でのダンパー変位には準静的成分が相対的に多く含まれる結果となる。この影響により、風方向でかつ減衰の高い A-3H において正弦波置換実験より得られたダンパー特性値は、ランダム波実験に対して貯蔵剛性 K'_d で最大約 1.3 倍、粘性係数 C_d では約 1.4 倍高い値となっている。

このように、風方向でかつ減衰の高い場合において、ダンパー特性に誤差が生じるものの、それ以外については、本手法により適切

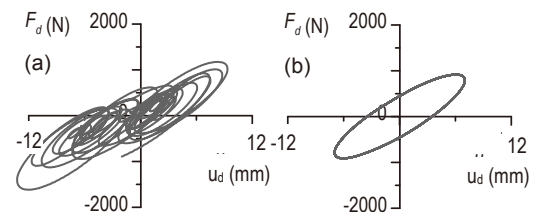


Fig.9 Comparison of (a) random and (b) sinusoidal hysteresis loop (A-3H; 3,600 to 3690 s)

な振幅と振動数に設定した置換正弦波を用いた正弦波実験を行うことで、ランダム波形での加振実験を行うことなく、長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパーの温度や特性の変化を評価できることが実験から確認することができた。風方向でかつ建物の減衰が高い場合においては、準静的成分の影響を考慮するために、ランダム振動時のダンパー特性の評価方法 (式(1)) や置換振動数・振幅の決定方法

(式(2))を修正する必要があると思われる。これについては今後の課題としたい。なお、長周期地震動を受ける超高層建物を模擬した実大規模振動台実験²⁰⁾において、式(2a)の継続時間 t_d を実効継続時間 d_0 ²¹⁾に変更することで、長周期地震動の特性を持つランダム波形についても、実架構内に設置されたオイルダンパーの温度上昇を正弦波置換法により評価できることを追記しておく²²⁾。

4. 時刻歴解析との比較

4.1 長時応答解析法

長時応答解析法は、振動数依存性を有する粘弾性ダンパーの動的特性を精度良く再現できる分数微分構成則¹³⁾に、粘弾性体・鋼板における熱伝導・伝達を考慮した熱伝導解析を組み込むことで、長時間振動時における粘弾性体内部の温度分布や応力・歪の変化も高精度に再現できる時刻歴解析手法である⁶⁾。長時応答解析法は、Fig.10に示すように、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 θ_j 、歪 γ_j を時刻歴で求めることができる。

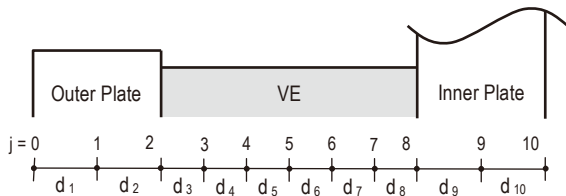


Fig.10 Example of element division for VE damper model⁶⁾

長時応答解析法の構成則は次式で表される⁶⁾。

$$\tau + a_j D^\alpha \tau = G [\gamma_j + b_j D^\alpha \gamma_j] \quad (3)$$

ここで、 $D^\alpha (=d^\alpha/dt^\alpha)$ は分数微分演算子を表す。 α は分数微分の次数、 a_j 、 b_j および G は構成則のパラメータである。本論文での数値積分にはL1アルゴリズムを用いている。式(3)の計算手法については文献6)および23)を参照されたい。

長時応答解析法に用いるパラメータは^{6),12),13)}、 $\alpha = 0.558$ 、 $G = 0.0392 \text{ N/mm}^2$ 、 $a_{ref} = 5.6 \times 10^{-3}$ 、 $b_{ref} = 2.10$ 、 $p_1 = 14.06$ 、 $p_2 = 97.32$ 、 $\theta_{ref} = 20^\circ\text{C}$ 、 $s\rho$ (粘弾性体) = $1.87 \text{ N/mm}^2/^\circ\text{C}$ 、 $s\rho$ (鋼板) = $3.64 \text{ N/mm}^2/^\circ\text{C}$ 、 κ (粘弾性体) = $0.188 \text{ N/s/}^\circ\text{C}$ 、 κ (鋼板) = $43.128 \text{ N/s/}^\circ\text{C}$ である。ここで、 a_{ref} 、 b_{ref} : 基準温度 θ_{ref} ($=20^\circ\text{C}$)での a_j および b_j の値、 s : 比熱、 ρ : 密度、 κ : 熱伝導係数である。ダンパーの分割数も文献6)と同様に、中板の半分までをモデル化し、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。

熱伝導解析では熱伝達係数の設定の違いにより、最大温度や定常になるまでの時間が異なるため²⁴⁾、熱伝達係数の設定には注意が必要である。特に、厚さ方向の1次元モデルの長時応答解析法における熱伝達は、外板側の境界と中板側の境界でのみ行われるモデル化となっているため、中板・外板側の熱伝達係数 $\alpha_{c,in}$ 、 $\alpha_{c,out}$ ⁶⁾には、ダンパーの形状を考慮した値を用いる必要がある。文献6)では、最初にダンパー形状を詳細に再現した3次元モデルを用いて、実験結果と一致するように3次元モデルにおける熱伝達係数 α_c を決定している(付録B参照)。この値は、ダンパー形状を3次元でモデル化しているため、伝熱工学の文献^{例えば24)}を参考に熱伝達係数を比較的容易に決定することができる。そして、3次元モデルにおける熱伝

導解析結果から、1次元モデルである長時応答解析法に用いるダンパー形状を考慮した中板・外板側の熱伝達係数 $\alpha_{c,in}$ 、 $\alpha_{c,out}$ を算出する方法を提案している⁶⁾。しかし、一般に熱伝達係数は、物体周りの対流の程度や材料の表面状態など様々な要因によって変化する²⁴⁾。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 $\alpha_{c,in}$ 、 $\alpha_{c,out}$ は、正弦波振動時とランダム振動時では異なる値となる可能性がある。そこで本論文では、まず長時応答解析法による解析結果がそれぞれの置換正弦波実験で一致するように熱伝達係数を試行錯誤的に決定する。その後、決定した熱伝達係数が、それぞれのランダム振動実験の解析に適用できるかを検証する。

4.2 正弦波実験のシミュレーション

上述したように、長時応答解析法では、中鋼板側と外鋼板側の熱伝達係数 $\alpha_{c,in}$ 、 $\alpha_{c,out}$ の設定が必要となる。熱伝達係数の違いにより温度上昇が異なることから、まず、置換正弦波での実験と解析の比較を全てのケースで行うこととした。その際、置換正弦波解析で用いる熱伝達係数を温度が一定値に漸近した際の値に概ね一致するように試行錯誤的にそれぞれ決定した。Table2に示す置換正弦波の置換振幅 A 、および置換振動数 f_r を用いて、12,000秒間の解析を行う。解析時間刻みは $\Delta t = 0.01$ 秒、ダンパー初期温度と周辺温度は実験と同条件の 24°C とする。

Fig.11(a), (b)に風方向および風直交方向における置換正弦波解析と実験結果の温度時刻歴をそれぞれ重ねて示す。なお、温度の表示位置はA~D点(Fig.1参照)の計4ヶ所とする。Fig.11(a), (b)から解析結果と実験結果を比較すると、外板(D点)、内板(A点)の温度は多少ずれがあるが、ダンパー特性に影響を与える粘弾性体温度(B, C点)については、解析結果と実験結果でよい対応を示していることが確認できる。

次に、置換正弦波を用いた解析と実験のダンパー特性について検討を行う。解析結果の K'_d と C_d についても、前章と同様に1,200秒毎に5サイクルずつ、実験結果と解析結果で同時刻の履歴から式(1a), (1b)より計算した。Fig.12(a), (b)に風方向および風直交方向における置換正弦波での解析と実験から得られた貯蔵剛性 K'_d と粘性係数 C_d の時間変化をそれぞれ示す。Fig.12(a), (b)より、解析結果に実験値との多少の誤差はあるものの、いずれのケースにおいても解析が実験結果を再現できていることが確認できる。

Table3に置換正弦波を入力した解析に用いた中板・外板側の熱伝達係数 $\alpha_{c,in}$ 、 $\alpha_{c,out}$ を全てのケースでまとめて示す。一般に物体周りの対流が早いほど熱伝達係数が大きくなることが知られていることから²⁴⁾、振動数(もしくは最大速度)が高いケースほど熱伝達係数が大きくなることが予想されたが、本実験では異なる結果となった。そこで、本研究では熱伝達係数をTable3で示す値に加えて、その値を2.0倍したものと、0.5倍したものを用いて解析を行い、熱伝達係数が解析結果に及ぼす影響を検討した。その結果、温度 θ 、貯蔵剛性 K'_d および粘性係数 C_d の12000秒における1.0倍との誤差は、振動数 f_r が高いほど大きいことが分かった。本検討範囲において、その誤差はいずれも ± 1 割程度であることが確認されたが、ダンパー形状や加振条件によって結果が異なることも予想される。長時応答解析法に用いる熱伝達係数の決定手法の確立するためには、実大のダンパーを用いた更なる検討が必要であると思われる。

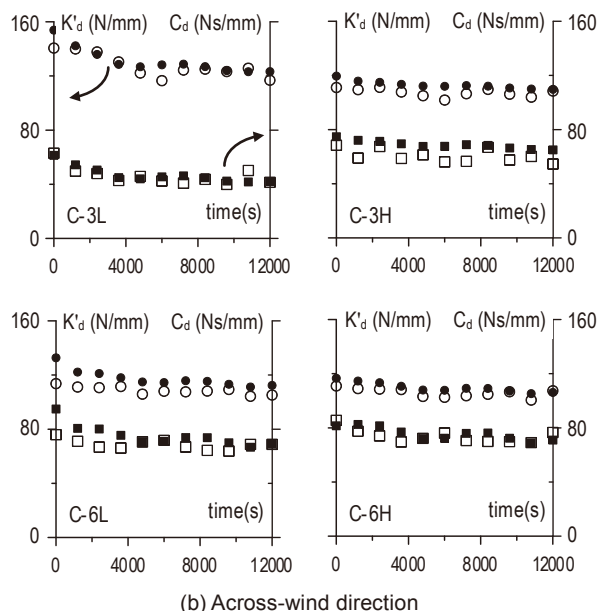
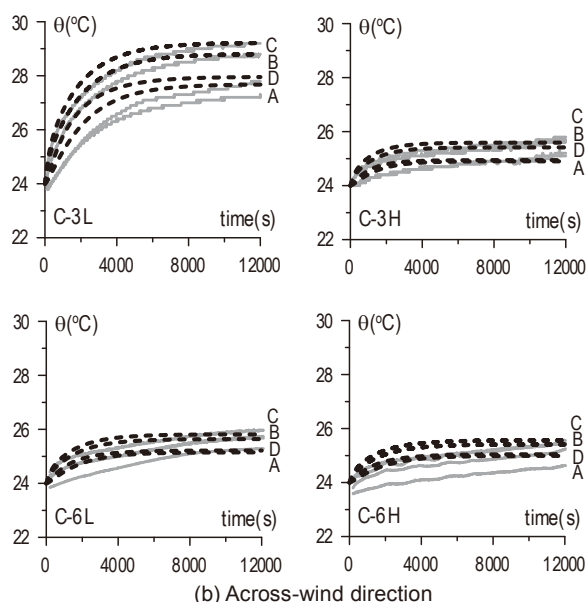
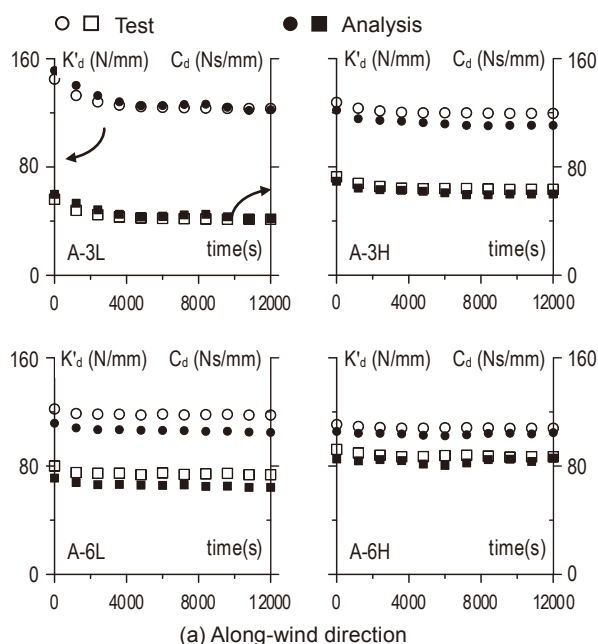
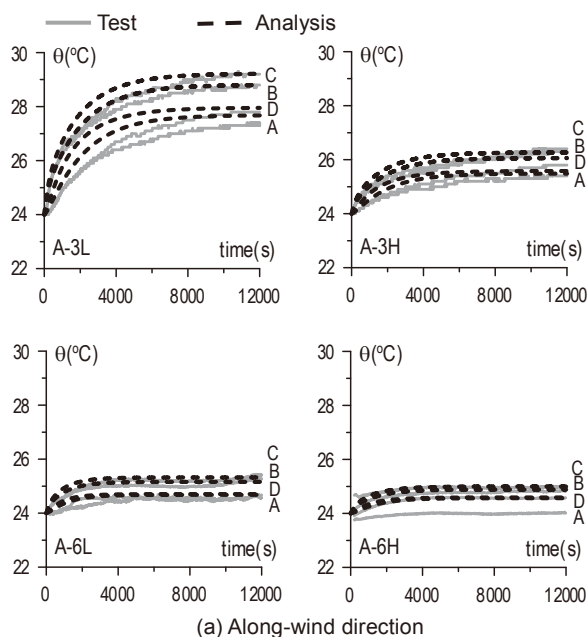


Fig.11 Test VS. analysis of temperature (Sinusoid)

Fig.12 Test VS. analysis of K'_d & C'_d (Sinusoid)

4.3 ランダム波実験のシミュレーション

前節で求めた、熱伝達係数を用いて (Table3) ランダム波による解析を行い、長時解析法による解析がランダム波実験の結果を精度良く再現できるか確認する。ランダム波解析には、2.2 節で作成したランダム波 (12,000 秒間) を用いる。4.2 節と同様に、解析時間刻みは $\Delta t = 0.01$ 秒、ダンパー初期温度と周辺温度は実験と同条件の 24°C とする。

Fig.13(a), (b)にランダム波での解析と実験結果の温度時刻歴を重ねて示す。温度の表示位置は Fig.11 と同じ A~D 点である。なお、Fig. 13 (a)は風方向での結果、Fig.13(b)は風直交方向での結果である。Fig. 13 (a), (b)より、解析結果においても実験結果と同様に、解析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・熱伝達の効果により、温度上昇が鈍くなる傾向が確認できる。さらに、解析結果と実験結果の温度を比

Table3 Heat transfer coefficient

Case	$\alpha_{c,out}$ (N/s/mm/ $^\circ\text{C}$)	$\alpha_{c,in}$ (N/s/mm/ $^\circ\text{C}$)
A-3L	0.021	0.018
A-3H	0.027	0.024
A-6L	0.050	0.047
A-6H	0.040	0.037
C-3L	0.021	0.018
C-3H	0.040	0.037
C-6L	0.030	0.027
C-6H	0.030	0.027

較しても、外板 (D 点)、内板 (A 点) の温度は多少ずれがあるが、粘弾性体の内部温度 (B, C 点) については、解析結果と実験結果でよい対応を示していることが、前節の正弦波による解析と同様の

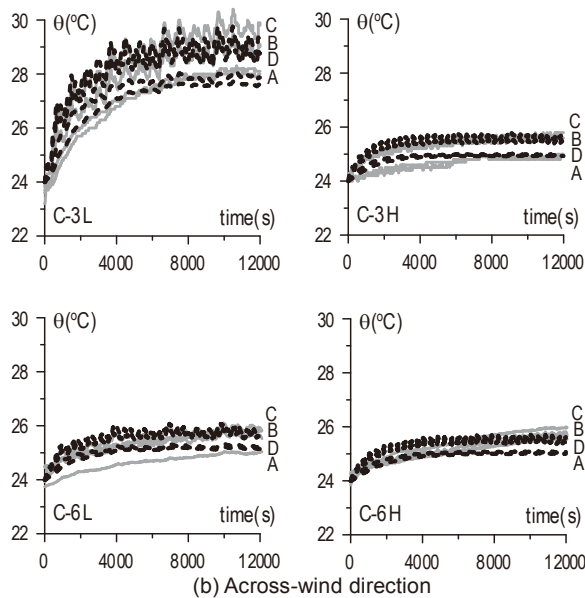
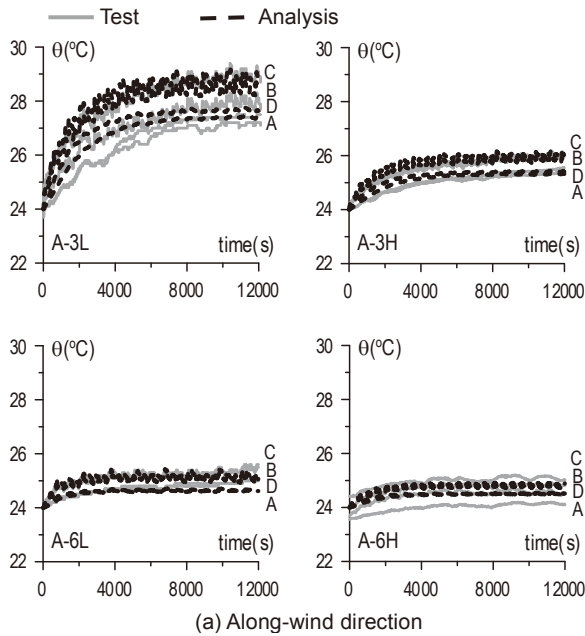


Fig.13 Test VS. analysis of temperature (Random)

精度で確認できる。

次に、ランダム振動解析と実験のダンパー特性について検討を行う。解析結果のダンパー特性の計算方法については、前節までと同様に、貯蔵剛性 K'_d および粘性係数 C_d をダンパー履歴から式(1a), (1b)の最小二乗法を用いて、1200 秒毎に 5 サイクルずつ、実験結果と解析結果で同時刻の履歴から算出している。Fig.14(a), (b)にランダム波による解析と実験における、 K'_d と C_d の時間変化を重ねて示す。図より、解析結果は実験結果と同様に、加振開始から大きく低下することなく一定値に漸近する特性を表現できていることが分かる。さらに、A-3H や A-6L で多少の誤差が確認できるものの、解析から得られた特性値は実験結果を良く再現できていることが確認できる。以上より、正弦波解析と同じ熱伝達係数を、対応するランダム波解析に用いることの妥当性および長時応答解析法のランダム振動における適用性を示すことができたと考える。

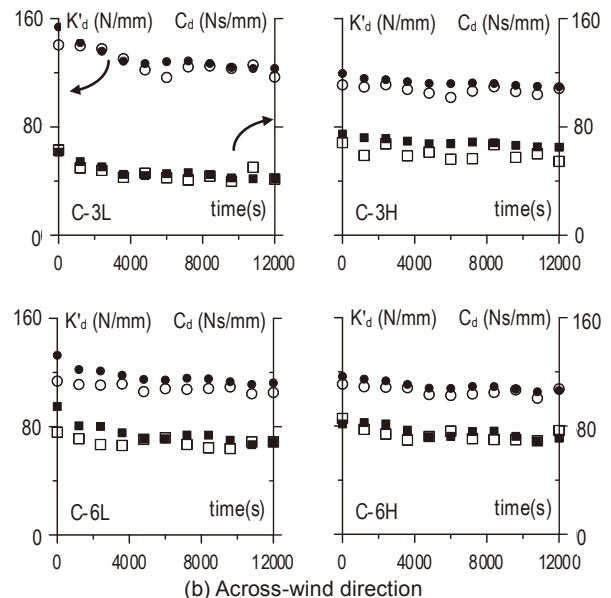
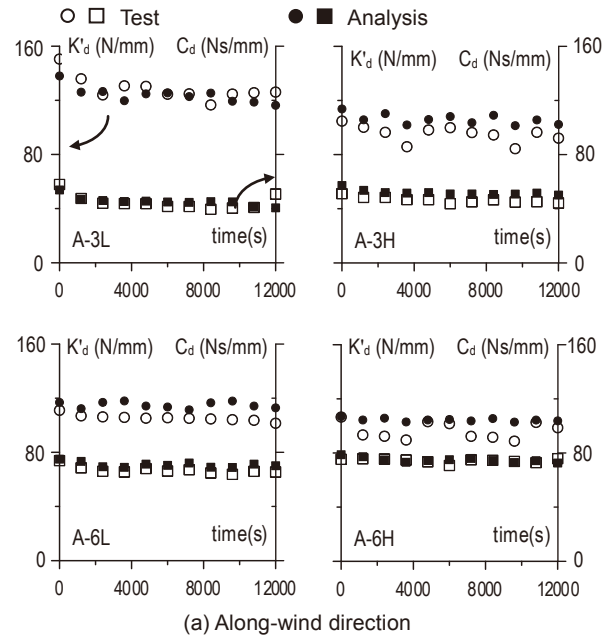


Fig.14 Test VS. analysis of K'_d & C_d (Random)

5. おわりに

本研究では、特性の異なる 8 種類の風応答波形を用いて、長時間のランダム波加振での粘弾性ダンパーの温度変化およびそれに伴うダンパー動特性の変化を実験的に確認すると共に、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の妥当性を実験的に検証した。さらに、熱伝導と熱伝達の効果を考慮できる時刻歴解析法（長時応答解析法）のランダム振動における適用性の確認を行った。以下に得られた知見を述べる。

1. 継続時間の長い風応答のような複雑な外乱に対しても、粘弾性ダンパーの温度と剛性・粘性係数は、正弦波実験と同様に、熱伝導・伝達の効果によって一定値に漸近することを実験的に確認した。
2. 正弦波置換法により得られる置換正弦波とランダム波での加振結果を比較すると、概ね同等の温度・剛性・粘性係数が得られ

たことから、時々刻々と変化するランダム振動時のダンパー特性を正弦波により評価できることが分かった。ただし、準静的成分の影響が大きくなる風方向の応答でかつ建物の減衰が高い場合においては誤差の大きい結果となった。これについては今後の課題とする。

- ランダム振動においても、長時応答解析法による解析結果は長時間振動における粘弾性ダンパーの温度やダンパー特性の変化を再現できることを示した。また、ランダム波での解析に用いる熱伝達係数として、対応する置換正弦波と同じ値を使用することができることを確認した。

今後は、実大粘弾性ダンパーを用いて、平均成分や高次モード成分を含んだ長時間のランダム振動時における粘弾性ダンパーの温度および動的特性の変化を、実験および解析の両面から検討すると共に、正弦波置換法の適用性についても検証する予定である。

謝辞

本研究の一部は、東京理科大学 北村研究室（当時）田上高行氏の修士論文の成果によるものです。また、文部科学省科学研究費補助金・若手研究(B)（代表研究者：佐藤大樹）の援助の下、本研究を実施いたしました。2名の査読者からは、貴著など意見を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 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
- 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3版, 2013.11
- 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
- Ferry, J.D.: Viscoelastic Properties of Polymers, John Wiley & Sons Inc., Third Ed., New York, 1980
- 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
- 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
- 下村祥一, 大熊武司:粘弾性ダンパーを有する木造建て建物の弾塑性風応答に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第73巻, 第632号, pp.1813-1821, 2008.10
- 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎:高層建築の制振を対象とした風洞実験装置の開発および風応答に関する基礎的研究ー粘性・粘弾性ダンパーを有する高層建築物の一樣流中における風洞実験ー, 日本建築学会構造系論文集, 第609号, pp.65-73, 2006.11
- 佐藤大樹, 田村哲郎, 笠井和彦:粘性・粘弾性ダンパーを有する高層建物の風応答特性に関する風洞実験, 日本建築学会構造系論文集, 第617号, pp.95-102, 2007.7
- 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎:粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第635号, pp.75-82, 2009.1
- 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎:粘弾性ダンパーを有する制振構造の振動数依存性を考慮した風応答予測法, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第646号, pp.2255-2262, 2009.12
- 佐藤大樹, 笠井和彦: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, 構造工学論文集, Vol.53B, pp.67-74, 2007.3
- 笠井和彦, 寺本道彦, 大熊潔, 所健:粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則, その1, 線形領域における温度・振動数依存のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 第543号, pp.77-86, 2001.5

- Daiki Sato, Kazuhiko Kasai and Tetsuro Tamura : Properties of Viscoelastic Damper under Wind Load and Analytical Method Considering Heat Conduction & Transfer, Proceedings of the 12th International Conference on Wind Engineering (ICWE12), pp.1263-1270, 2007.7
- 日本建築学会:建築物荷重指針・同解説, 丸善, 2004.9
- 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, 日本風工学会学会研究会誌, 第11号, pp.5-18, 1982.1
- 平井宏幸, 吉江慶祐, 佐藤大樹, 鈴木悠也, 北村春幸:変動風力を受ける超高層建築物の高次モード応答特性, 日本建築学会技術報告集, 第18巻, 第38号, pp.79-84, 2012.2
- 笠井和彦, 所健:粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則, その2, 温度上昇および歪・歪速度がもたらす非線形性のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 第561号, pp.55-63, 2002.11
- 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
- 佐藤大樹, 島田侑, 大内隼人, 長江拓也, 北村春幸, 福山國夫, 梶原浩一, 井上貴仁, 中島正愛:長周期地震動を受ける鋼構造超高層建物のエネルギー吸収と分担率ー部分切り出し架構に対するE-ディフェンス振動台実験ー, 日本建築学会構造系論文集, 第75巻, 第653号, pp.1217-1226, 2010.7
- Trifunac, M.D. and Brady, A.G.:A Study on Duration of Strong Earthquake Ground Motion., Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.65, No.3, pp.581-626, 1975.6
- 佐藤大樹, 大内隼人, 長江拓也, 五十幡直文, 北村春幸, 中島正愛:実大架構内に設置したオイルダンパーの性能評価および長周期地震動による温度上昇, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.529-530, 2010.9
- 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
- J.P.ホールマン:伝熱工学(上), ブレイン図書出版, 1993

付録A ダンパー変位波形の拡大図

Fig.4(a), (b)に示したダンパー変位波形の中で、ここでは例として A-3H および C-6L の拡大図を以下に示す。

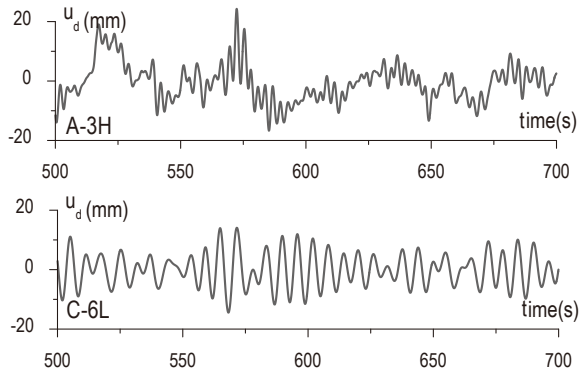


Fig.A1 Enlarged figure of time history of damper deformation

付録B 文献 6)における数値の訂正

文献 6)の「表 1 三次元有限要素解析用パラメータ」で誤記があったため、TableB1 のように訂正する（表中下線部）。

TableB1 Parameter of 3-D analysis model 6)

	鋼板	粘弾性体
κ (N/s/°C)	43.128	0.188
s (N・cm/kg/°C)	<u>46.63x10³</u>	19.40x10 ⁴
ρ (kg/cm ³)	<u>7.80x10⁻³</u>	<u>1.0x10⁻³</u>
α_c (N/s/cm/°C)	0.25	0.25

$$1 \text{ N/s/cm/}^{\circ}\text{C} = 100 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$$

PROPERTIES OF VISCOELASTIC DAMPER UNDER WIND-INDUCED EXCITATION AND SIMPLIFIED EVALUATION METHOD USING SINUSOIDAL-WAVE

*Daiki SATO^{*1}, Ken TOKORO^{*2}, Kazuhiko KASAI^{*3}
and Haruyuki KITAMURA^{*4}*

^{*1}Assoc. Prof., Structural Eng. Research Center, Tokyo Institute of Tech., Dr. Eng.

^{*2}Manager, 3M Japan Limited, M. Eng.

^{*3}Prof., Structural Eng. Research Center, Tokyo Institute of Tech., Ph. D.

^{*4}Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

In Japan, many high-rise buildings adopt the passive control devices, such as the steel damper, oil damper, viscous damper, viscoelastic (VE) damper, and etc., to decrease the response of buildings. It has been recognized that VE dampers have significant advantage over other types of the dampers in controlling responses of the buildings against not only the earthquake excitation but also the wind-induced excitation. By dissipating the energy through the shear deformation of VE material, it causes temperature rise resulting softening of the material. The significant heat conduction and transfer can control the temperature-rise effect of VE damper under long duration load. Therefore, when we design the high-rise building with VE dampers in case of long duration loading such as the wind-induced excitation, the heat conduction and the heat transfer effects of VE damper must be considered.

In Chapter 2, the long duration wind-induced vibration tests of VE damper are carried out to estimate the damper temperature rise and to evaluate the dynamic property of VE damper, such as the damper stiffness and the damping, under the long duration random vibration. In addition, the long duration sinusoidal-wave vibration tests are carried out in Chapter 3. This simplified experimental method using sinusoidal-wave can estimate the dynamic property of the VE damper under the long duration random vibration without using the random deformation time history data. The validity of this method is confirmed by comparing with the random vibration test results to the sinusoidal-wave test results. In Chapter 4, the analysis method of VE damper which is combined with the one-dimensional heat transfer analysis and VE constitutive rule using fractional time-derivatives of stress and strain is carried out. This method can calculate the ever-changing force-deformation and temperature time histories of VE damper. The accuracy of this analysis method is confirmed by comparing with not only the long duration sinusoidal-wave test results but also the wind-induced random vibration test results. Analytical results are consistent with random vibration test results using heat-transfer coefficient obtained from simplified sinusoidal-wave tests.

(2014年9月10日原稿受理, 2015年1月9日採用決定)