

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	風応答時における実大粘弾性ダンパーの簡易評価実験および解析モデルの提案
Title(English)	SIMPLIFIED PERFORMANCE EVALUATION TESTS OF FULL-SCALE VISCOELASTIC DAMPER ON WIND-INDUCED RESPONSE AND PROPOSAL OF ANALYTICAL MODEL
著者(和文)	佐藤大樹, 笠井和彦, 松田和浩, 杉山暢方
Authors(English)	Daiki Sato, KAZUHIKO KASAI, Kazuhiro Matsuda, Nobumasa Sugiyama
出典(和文)	第24回風工学シンポジウム論文集, Vol. 24, , pp. 289-294
Citation(English)	PROCEEDINGS OF THE 24th NATIONAL SYMPOSIUM ON WIND ENGINEERING, Vol. 24, , pp. 289-294
発行日 / Pub. date	2016, 12

# 風応答時における実大粘弾性ダンパーの簡易評価実験および解析モデルの提案

## SIMPLIFIED PERFORMANCE EVALUATION TESTS OF FULL-SCALE VISCOELASTIC DAMPER ON WIND-INDUCED RESPONSE AND PROPOSAL OF ANALYTICAL MODEL

佐藤大樹<sup>1)</sup> 笠井和彦<sup>2)</sup> 杉山暢方<sup>3)</sup> 松田和浩<sup>4)</sup>

Daiki SATO<sup>1)</sup>, Kazuhiko KASAI<sup>2)</sup>, Nobumasa SUGIYAMA<sup>3)</sup>, and Kazuhiro MATSUDA<sup>4)</sup>

### ABSTRACT

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 a full-scale viscoelastic damper during long duration wind-induced vibration and presents the simplified evaluation method. In addition, we propose a new analytical model which is considering heat transfer effects. Good accuracies of this analytical model is demonstrated by comparing with results of the long duration loading test.

Key Words : Viscoelastic Damper, Wind-induced Response, Analytical Model

### 1. はじめに

粘弾性ダンパーは微小変形から振動エネルギーを吸収するため、地震時の応答だけでなく風応答の制振装置として有用である。粘弾性ダンパーは振動時に吸収した振動エネルギーを熱へと変換する際に発熱し、粘弾性体温度が上昇する。その温度上昇に伴いダンパー性能が低下する特性(温度依存性)を有している。さらに、発熱量は振動数に依存する特性(振動数依存性)も有する。そのため、継続時間が長い風応答の制振に粘弾性ダンパーを用いる場合には、長時間のランダム振動によるダンパー温度および動的特性の変化を、実大ダンパーを用いた動的加振実験により検証を行なう必要がある<sup>1)</sup>。しかし、実験に使用するランダム波を作成・選定することは非常に煩雑であることに加え、実験装置の性能上困難な場合が多い。そのため、筆者らは文献<sup>2)</sup>において、正弦波を用いて風応答時におけるダンパー特性と変化を等価に評価できる手法(正弦波置換法)を提案したが、2面せん断型の小型の粘弾性ダンパー模型による検証に留まっている<sup>3)</sup>。また、既往の研究<sup>1)</sup>では、熱伝導・伝達による放熱を再現できる解析モデルが提案されているが、複層の粘弾性ダンパーには適用できていない。さらに粘弾性ダンパーの動的特性は、温度、振動数、振幅による変化<sup>4)</sup>に加えて、繰り返し载荷による変化がある。そこで本報では、実大の粘弾性ダンパー<sup>5)-7)</sup>を対象とした加振実験を行い、風応答時におけるダンパーの温度上昇および動的特性を検討するとともに、正弦波置換法の実大粘弾性ダンパーに対する適用性を検証し、さらに長時間の繰返しによる特性変化を再現できる解析モデルを提案することを目的とする。

### 2. 実大粘弾性ダンパーの長時間風応答加振実験と正弦波置換実験

#### 2.1 試験体の概要

本研究では、ダンパー長さ 4024.5 mm, 層せん断面積  $9.12 \times 10^5 \text{ mm}^2$ , 粘弾性体の1層分の厚さ 8 mm で6層せん断型の実大粘弾性ダンパーを試験体として用いる<sup>5)</sup>。図1に本実験の試験体の加振状況および試験体のB-B'断面における温度計測位置および番号を示す。本実験において、ダンパー温度を23箇所計測しているが、本報ではその中で、B-B'断面に設置された1~3chの温度について結果を示す。

本報は文献5)-7)に加筆・修正を加えたものである。

1), 2), 4) 東京工業大学未来産業技術研究所 准教授, 教授, 助教 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)  
3) (株) フジタ (元東京工業大学大学院生)

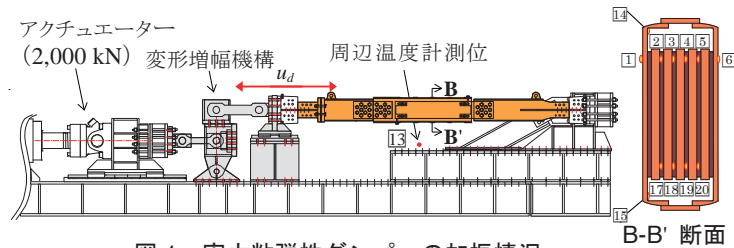


図1 実大粘弾性ダンパーの加振情況

## 2.2 ダンパー変形波形の作成方法

本報では、固有周期  $T_0 = 3$  秒で減衰定数  $\xi_0 = 2\%$  および  $10\%$  の建物を対象とし<sup>8)</sup>、風方向および風直交方向の1次モーダル風力を用いた1質点系モデルによる時刻歴応答解析を行い、得られた変形波形を標準偏差  $\sigma_u = 4.0$  mm となるようにそれぞれを基準化したものを、ダンパーの変形波形として用いた(以降、風応答波と呼ぶ)<sup>3)</sup>。実験装置の記憶性能の制約により1区間の波形を750秒として連続で繰り返す加振を行なった。図2に、例として風方向  $\xi_0 = 2\%$  (A-3L) および風直交方向  $\xi_0 = 2\%$  (C-3L) の風応答波を示す。正弦波置換法により、ランダム振動時と等価なダンパー特性を得るための置換振幅  $A_r$  および置換振動数  $f_r$  は、風応答波の標準偏差  $\sigma_u$ 、継続時間  $t_a$ 、および  $t_a$  間におけるゼロクロッシング数  $N_0^+$  を設定することで、次式より求められる<sup>2)</sup>。

$$A_r = \sqrt{2}\sigma_u, \quad f_r = N_0^+ / t_a \quad (1), (2)$$

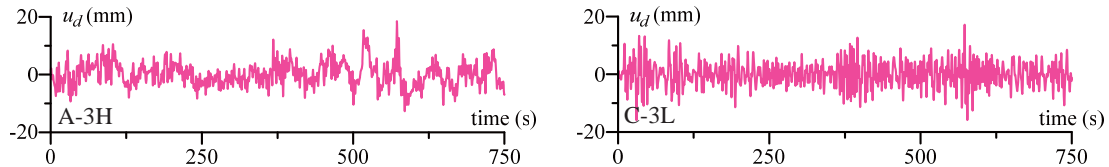


図2 風応答波の変形時刻歴(1区間分)

## 2.3 風応答波加振実験と正弦波置換実験の比較

本実験では、ダンパー周辺温度  $\theta_c$  を 24, 26, 28, 30°C の4種類で実験を行った<sup>9)</sup>。なお、 $\theta_c$  の変化の幅が  $\pm 1^\circ\text{C}$  以内となるように周辺温度をコントロールしながら実験を行なった。

図3, 4に置換正弦波実験により得られたB-B'断面左側上段の温度時刻歴および貯蔵剛性  $K'_d$  と粘性係数  $C_d$  を示す。本章では紙幅の制約により、風方向  $\xi_0 = 2\%$  (A-3L) で30°C と風直交方向  $\xi_0 = 10\%$  (C-3H) で24°C の実験結果について示す。貯蔵剛性  $K'_d$  はダンパー変形  $u_d$  - ダンパー力  $F_d$  の履歴ループの傾きを表し、式(3)の最小二乗法によって求められる<sup>2),3)</sup>。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  $\dot{u}_d$  - ダンパー力  $F_d$  の履歴ループの傾きを意味し、式(4)の最小二乗法により求められる<sup>2),3)</sup>。

$$K'_d = \frac{n \sum u_{d,i} F_{d,i} - \sum u_{d,i} \sum F_{d,i}}{n \sum u_{d,i}^2 - (\sum u_{d,i})^2}, \quad C_d = \frac{n \sum \dot{u}_{d,i} F_{d,i} - \sum \dot{u}_{d,i} \sum F_{d,i}}{n \sum \dot{u}_{d,i}^2 - (\sum \dot{u}_{d,i})^2} \quad (3), (4)$$

ここで、 $\Sigma$  は総和記号で、履歴の  $n$  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、実載荷時間の開始時間から1,000秒ごとに400秒間計測した履歴から算出している。

図3より、加振開始直後は、エネルギー吸収による粘弾性体内部での発熱によって温度が上昇していることが分かる。その後、熱伝導・伝達の効果によって温度上昇が鈍くなり、一定値に漸近する様子が確認できる。温度上昇や最高温度は入力波形や周辺温度といった実験条件によって異なることも分かる。図4より、風応答波において、加振直後は温度上昇に伴い、 $K'_d$  と  $C_d$  も低下するが、温度上昇が鈍くなるに従って一定値に漸近することが確認できる。

次に、置換正弦波による結果の比較を行なう。図3, 4より、置換正弦波実験の結果は風応答波実験での温度上昇およびダンパー特性の変化を概ね再現できていると言える。紙幅の制約によりここでは示さないが、他の応答波形についても同等の再現性を確認している<sup>9)</sup>。以上より、複数層の粘弾性体を有する実大ダンパーにおいても、置換正弦波で長時間の風応答時におけるダンパーの温度変化や動特性の変化を評価できることが確認された。

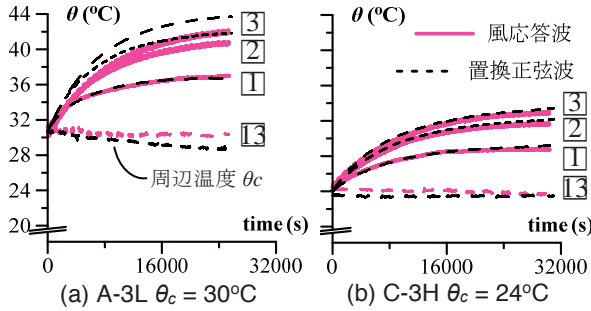


図3 B-B'断面左側上段 風応答波と置換正弦波の温度時刻歴

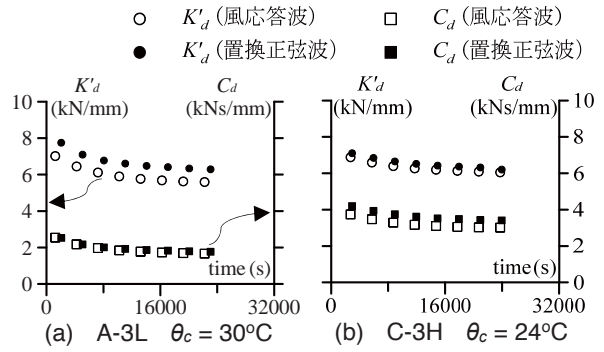


図4 風応答波と置換正弦波での  $K'_d$ ,  $C_d$  の変化

## 2.4 繰り返し载荷による動的特性の変化

本節では、長時間の繰り返し载荷による動的特性（貯蔵剛性  $K'_d$  と損失係数  $\eta_d$ ）の変化に関する考察を行う。はじめに、風方向  $\xi_0 = 10\%$  (A-3H) および風直交方向  $\xi_0 = 2\%$  (C-3L) とダンパー特性の変化が等価となるように設定された2種類の置換正弦波载荷から得られた実験値と、文献4)の解析モデルから得られた計算値を比較する。置換正弦波振動時における  $K'_d$  は前述した式(3)で求められる。 $\eta_d$  は履歴ループの太さを表す指標であり、ダンパーの最大変形  $u_{d,max}$  および1サイクル当たりのダンパーの吸収エネルギー  $W_d$  を用いて式(5)より求められる。本報では実験結果より求めた貯蔵剛性  $K'_d$  と損失係数  $\eta_d$  には、後述する計算により求めた値と区別するために添え字 **exp** を付ける。

$$\eta_{d,exp} = \frac{W_d}{\pi K'_{d,exp} (u_{d,max})^2} \quad (5)$$

一方、粘弾性ダンパーの動的特性の計算値は、分数微分構成則の定常解として、笠井により下式で提案されている<sup>4)</sup>。なお、本報では下式より求めた貯蔵剛性  $K'_d$  と損失係数  $\eta_d$  には添え字 **cal** を付ける。

$$K'_{d,cal} = G \frac{1 + ab\omega^{2\alpha} + (a+b)\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)}{1 + a2\omega^{2\alpha} + 2a\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \cdot \frac{A_s}{d}, \quad \eta_{d,cal} = \frac{(-a+b)\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)}{1 + ab\omega^{2\alpha} + (a+b)\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (6), (7)$$

ここで、 $\omega$  は円振動数、 $A_s$ ,  $d$  は粘弾性体の総せん断面積および厚さである。また、 $\alpha$ ,  $G$  は材料の定数、 $a$  と  $b$  は粘弾性体の温度依存性を表現する係数である。さらに  $b$  と  $G$  を歪みによって変化させることで、非線形挙動を再現している<sup>4)</sup>。式(6), (7)より、係数  $b$  を大きくすると  $K'_d, \eta_d$  が大きくなり、係数  $G$  は  $K'_d$  を比例的に増減させることが分かる。

図5に、貯蔵剛性  $K'_d$  および損失係数  $\eta_d$  の実験値に対する計算値の比の推移をそれぞれ示す。図の横軸の  $\Sigma E_d$  は、ダンパーで吸収したエネルギーを粘弾性体の体積で除したエネルギー吸収密度  $E_d$  の累積値である。計算値はプロットの時点における粘弾性体の温度、振動数、振幅の実験値を用いて式(6), (7)より算出している。図5より、累積エネルギー吸収密度  $\Sigma E_d$  が増加しても、貯蔵剛性  $K'_d$  の実験値と計算値で誤差は小さいが、損失係数の計算値は実験値より低くなる事が分かる。これは、計算値が温度、振動数、振幅による変化を考慮した値ではあるが、長時間の繰り返し载荷による影響を考慮していないことが原因であると考えられる。そのため、長時間の繰り返し载荷による損失係数の変化を再現する解析モデルの構築が必要である。なお、この損失係数の変化は永久的なものではなく、加振終了後において行われた性能確認試験（振幅4.0mm、振動数1.0Hz）において、加振前の値に戻っている事が確認されている。

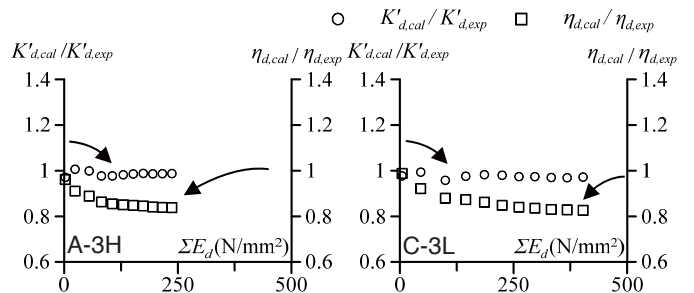


図5  $K'_d$  と  $\eta_d$  の実験値と計算値の比較

## 3. 粘弾性ダンパーの解析モデルの提案

### 3.1 損失係数の変化のモデル化の精度

前章では繰り返し载荷による損失係数の変化について述べた。このような現象の再現を図るため、新たに  $\lambda_3$ ,  $\lambda_4$  を変数として  $b$ ,  $G$  を次式のように設定する。

$$b^{(j)} = b_{ref} (\lambda^{(j)})^\alpha \lambda_1^{(j)} \lambda_3^{(j)}, \quad G^{(n)} = G_{ref} \lambda_2^{(n)} \lambda_4^{(n)} \quad (8), (9)$$

ここで、 $b_{ref}$ ,  $G_{ref}$  は基準温度 (20°C) での  $b$ ,  $G$  の値、 $\lambda$  は温度による変化を表す変数 (シフトファクター)、 $\lambda_1, \lambda_2$  は軟化を表現する変数<sup>4)</sup>である。 $\eta_d$  を変えるためには  $b$  を変化させることが必要であるが、前述したように  $K'_d$  も同時に変化してしまう (式(6))。そのため、 $G$  に  $\lambda_4$  を新たに加えることで  $K'_d$  の変化を抑えるようにしている (式(9))。

$\lambda_3, \lambda_4$  は  $\Sigma E_d$  の関数として表すことですべての実験値で概ね同じ値となる事が分かった<sup>6),7)</sup>。よって、本報では  $\lambda_3, \lambda_4$  を次式のようにモデル化した。

$$\lambda_3^{(n)} = C_5^{(n)} \left( \sum E_d^{(n)} \right)^{C_5^{(n)}} + 1, \quad \lambda_4^{(n)} = C_6^{(n)} \left( \sum E_d^{(n)} \right)^{C_6^{(n)}} + 1 \quad (10), (11)$$

ここで、 $\Sigma E_d^{(n)}$  は  $n$  ステップ時までのエネルギー吸収密度の累積値である。 $C_5$  は式(1)に示した置換振幅  $A_r$  に比例し、周辺温度  $\theta_c$  の 2 乗に反比例する傾向が確認できたため<sup>5)</sup>、実験値に対して対数近似により次式でモデル化した。

$$C_5^{(n)} = C_{51} \ln \left( A_r^{(n)} / (\theta_c^{(n)})^2 \right) + C_{52} \quad (12)$$

また、 $C'_5, C_6$  の値は  $C_5$  を用いて式(13), (14)より、 $C'_6$  の値は  $C_6$  を用いて式(15)より算出される。

$$C_5^{(n)} = C_{53} \cdot (C_5^{(n)})^{C_{54}}, \quad C_6^{(n)} = C_{61} \cdot e^{C_{62} \cdot C_5^{(n)}}, \quad C'_6^{(n)} = C_{63} \cdot (C_6^{(n)})^{C_{64}} \quad (13) - (15)$$

$C_{51}, C_{52}, C_{53}, C_{54}, C_{61}, C_{62}, C_{63}, C_{64}$  の値を実験値から同定し、それぞれ、 $1.541 \times 10^{-1}$ ,  $8.106 \times 10^{-1}$ ,  $1.157 \times 10^{-1}$ ,  $-4.558 \times 10^{-1}$ ,  $-5.629 \times 10^{-3}$ ,  $13.06$ ,  $4.428 \times 10^{-2}$ ,  $-5.414 \times 10^{-1}$  とした<sup>6)</sup>。

### 3.2 ランダム波における計算方法

$C_5^{(n)}$  を算出するためには各ステップでの置換振幅  $A_r^{(n)}$  の値が必要となる (式(12))。ランダム振動時において置換振幅  $A_r^{(n)}$  を算出するためには、式(1)からも分かるように  $n$  ステップまでのダンパー変形の標準偏差  $\sigma_u^{(n)}$  を算出すればよい。 $\sigma_u^{(n)}$  は  $n$  ステップまでの  $u_d$  を用いて、次式より求められる。

$$\sigma_u^{(n)} = \sqrt{\frac{\tilde{u}_d^{(n-1)}}{n} - (\bar{u}_d^{(n)})^2} \quad (16)$$

ここで、 $\tilde{u}_d$  は  $u_d$  の 2 乗和、 $\bar{u}_d$  は  $u_d$  の平均値を表しており、次式にて算出される。

$$\tilde{u}_d^{(n-1)} = \tilde{u}_d^{(n-2)} + (u_d^{(n-1)})^2, \quad \bar{u}_d^{(n)} = \frac{\bar{u}_d^{(n-1)} \cdot (n-1) + u_d^{(n)}}{n} \quad (17), (18)$$

ただし、 $n = 0$  の時は、 $\tilde{u}_d^{(0)} = 0$ ,  $\bar{u}_d^{(0)} = 0$  となる。以上より、式(16)~(18)を用いることで、ランダム波においても置換振幅  $A_r^{(n)}$  を逐次算出することが可能となる。

### 3.3 熱の伝導・伝達の再現

長時間の振動による粘弾性ダンパーの特性変化を精度良く予測するためには、振動時における粘弾性体の温度を精度良く再現することが重要である。筆者らは、応力-ひずみの面積から算出される吸収エネルギー密度を用いて粘弾性体内部での発熱量を計算し、さらに各ステップで熱伝導解析を行ない、熱伝導と熱伝達による温度変化を考慮できる解析モデルを提案している<sup>1)</sup>。ただし、本報で対象とする粘弾性ダンパーのように、複数層の粘弾性と鋼板が存在する場合は、熱伝導解析に要する時間が増大する。そこで本報では、熱伝導解析を省略した解析モデルを提案する。 $n+1$  ステップ時の粘弾性体の温度  $\theta_d^{(n+1)}$  を、発熱量  $\theta_E^{(n)}$  と熱の伝導・伝達による放熱量  $\theta_V^{(n)}$  の関係から次式で算出する。

$$\theta_d^{(n+1)} = \theta_d^{(n)} + \theta_E^{(n)} - \theta_V^{(n)} \quad (19)$$

ここで、 $\theta_E^{(n)}$  は吸収エネルギー密度  $E_d^{(n)}$  に比例した温度上昇量で表され、式(20)で算出される。また、熱伝導と熱伝達による温度変化を表す  $\theta_V^{(n)}$  は、粘弾性体温度  $\theta_d^{(n)}$  と周辺温度  $\theta_c^{(n)}$  の温度差に比例するものと仮定する (式(21))。その比例係数を  $\alpha_{cv}$  とする。

$$\theta_E^{(n)} = E_d^{(n)} / s\rho, \quad \theta_V^{(n)} = \alpha_{cv}^{(n)} (\theta_d^{(n)} - \theta_c^{(n)}) \quad (20), (21)$$

ここで、 $s\rho$  は比熱と密度の積である。図 6 に A-3H, C-3L の置換正弦波実験より、式(19)~(21)を用いてサイクル毎に算出した  $\alpha_{cv}^{<j>}$  の時刻歴を示す。ここで、 $j$  はサイクル数を表す。図 6 より、 $\alpha_{cv}^{<j>}$  は時間の経過とともに小さくなり、載荷停止後はほぼ一定の値となることが分かる。図 7 に  $\alpha_{cv}^{<j>}$  の実験値とモデル式の比較を示す。図 7 に示すように、

温度差と吸収エネルギー密度を横軸にとり  $\alpha_{CV}^{<j>}$  を整理すると、両実験ともにある一定の傾きに沿って  $\alpha_{CV}^{<j>}$  は分布していることが確認できる。この傾向を考慮し、図 7 の傾きから  $n$  ステップにおける  $\alpha_{CV}^{(n)}$  を次式のように設定した。

$$\alpha_{CV}^{(n)} = C_7^{(n)} E_d^{(n)} / (1 - \theta_c^{(n)} / \theta_d^{(n)}) \quad (22)$$

ここで、 $C_7$  は放熱量を決める係数であり、 $C_7$  の値は置換振動数  $f_r^{(n)}$  と周辺温度  $\theta_c^{(n)}$  が高いほど小さくなる傾向が確認されたため、 $C_7$  を次式で表すこととする<sup>7)</sup>。

$$C_7^{(n)} = C_{71} (f_r^{(n)} (\theta_c^{(n)})^2)^{C_{72}} \quad (23)$$

実験値に一致するように  $C_{71}$ 、 $C_{72}$  の値を同定し、それぞれ  $4.954 \times 10^{-2}$ 、 $-2.485 \times 10^{-1}$  とした<sup>7)</sup>。式(23)において、 $C_7$  を計算する際の置換振動数  $f_r$  は、下式より算出される。

$$f_r^{<j>} = \frac{j}{\sum_{j=1}^j t_a^{<j>}} \quad (24)$$

ここで、 $t_a^{<j>}$  は  $j$  回目にダンパー変形がゼロ軸を正の傾きで交差(ゼロクロス)するまでの時間である。

このように、正弦波置換法はランダム振動時の特性を一つの振幅  $A_r$  と振動数  $f_r$  で表される正弦波へと変換できるため、振動数や振幅によって複雑に変化する粘弾性ダンパーの特性変化を整理し、それをモデル化する際にも大変有用な手法である。

### 3.4 解析モデルのアルゴリズム

ランダムな変形  $u_d^{(n)}$  における非線形モデルの力  $F_d^{(n)}$  の計算アルゴリズムを以下に示す。 $n = 0$  は初期条件を表す。また、 $\theta_d^{(1)}$  を  $\theta_d^{(0)}$  (初期温度)と同値に設定する。まず、粘弾性体の歪  $\gamma^{(n)}$  と歪速度  $\dot{\gamma}^{(n)}$  を変形  $u_d^{(n)}$  から求め、温度  $\theta_d^{(n)}$  と最大歪  $\gamma_{\max}^{(n)}$  からシフトファクター  $\lambda^{(n)}$ 、 $\lambda_1^{(n)}$ 、 $\lambda_2^{(n)}$  を求める<sup>4)</sup>。次に、分数微分モデルの応力  $\tau^{(n)}$  を粘弾性体の歪  $\gamma^{(n)}$  などから次式より求める<sup>4)</sup>。

$$\tau^{(n)} = \frac{-a^{(n)} \sum_{i=1}^N w^{(i)} \tau^{(n-i)} + G^{(n)} b^{(n)} \sum_{i=0}^N w^{(i)} \tau^{(n-i)} + (\Delta t)^\alpha G^{(n)} \gamma^{(n)}}{(\Delta t)^\alpha + a^{(n)} w^{(0)}} \quad (25)$$

ここで、 $w^{(i)}$  は解析前に予め計算された重み係数である<sup>4)</sup>。 $N$  の定義や式(25)の詳細についても文献<sup>4)</sup>を参照されたい。歪速度に依存する硬化現象を考慮する非線形バネの応力  $\tau_s^{(n)}$  を、バネ定数  $G_h^{(n)}$  を用いて求める<sup>4)</sup>。硬化現象を考慮する場合、最終的な応力の和  $\tau_{tot}^{(n)}$  およびダンパー力  $F^{(n)}$  を得る。式(22)~(24)より熱伝達係数  $\alpha_{CV}^{(n)}$  を求める。また、 $n+1$  ステップ時の粘弾性体の温度  $\theta_d^{(n+1)}$  を式(19)~(21)より求め、次ステップに備える。最後に、シフトファクター  $\lambda^{(n)}$ 、 $\lambda_1^{(n)}$ 、 $\lambda_2^{(n)}$  および長時間の繰り返し载荷による損失係数の変化を再現するための  $\lambda_3^{(n)}$ 、 $\lambda_4^{(n)}$  を式(10)、(11)より求め、次ステップで用いる  $b^{(n+1)}$ 、 $G^{(n+1)}$  を式(8)、(9)より計算する。

### 3.5 解析モデルの精度検証

本報で提案した解析モデルの精度検証を行う<sup>7)</sup>。図 8(a)~(c)に置換正弦波载荷の粘弾性体中心温度の時刻歴、貯蔵剛性と粘性係数の時刻歴および载荷停止直前の計測区間における最大振幅付近の 20 秒間の履歴の比較を示す。ここで、図 8(b)は 3,000 秒毎に 400 秒間の計測を 3 回行い、その平均値をプロットしている。図 8(a)~(c)より、解析モデルは置換正弦波の実験値を精度よく再現できているといえる。

次に、図 9(a)~(c)に風応答波载荷の粘弾性体温度の時刻歴、貯蔵剛性と粘性係数の時刻歴および载荷停止直前の計測区間における最大振幅付近の 20 秒間の履歴の比較を示す。図 9(a)から、解析モデルの粘弾性体温度の最大誤差は 2°C 程度であり、実験値を概ね再現できているといえる。また、図 9(b)より A-3H では粘性係数、C-3L では貯蔵剛性の解析値が実験値の約 0.8 倍低い、図 9(c)より解析値と実験値の履歴はほぼ一致していることから、動的特性においても実験値を概ね再現できているといえる。紙幅の制約により、本報では 2 ケースの結果のみを示しているが、他のケースについても同等以上の精度が得られている事を確認している。以上より、提案した解析モデルは風応答波でも良好な精度で粘弾性体の挙動を再現できることが示されたと考える。

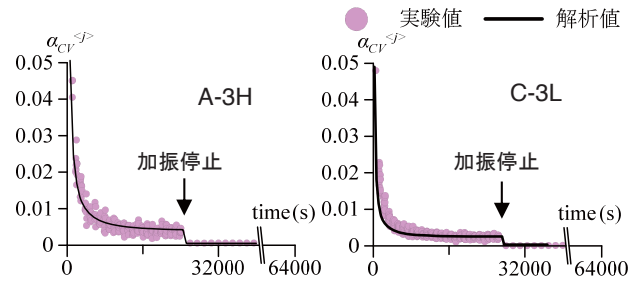


図 6 置換正弦波载荷における  $\alpha_{CV}$  の時刻歴

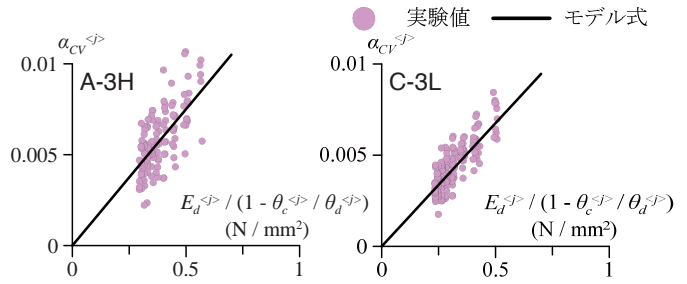


図 7 置換正弦波载荷における  $\alpha_{CV}$  の設定

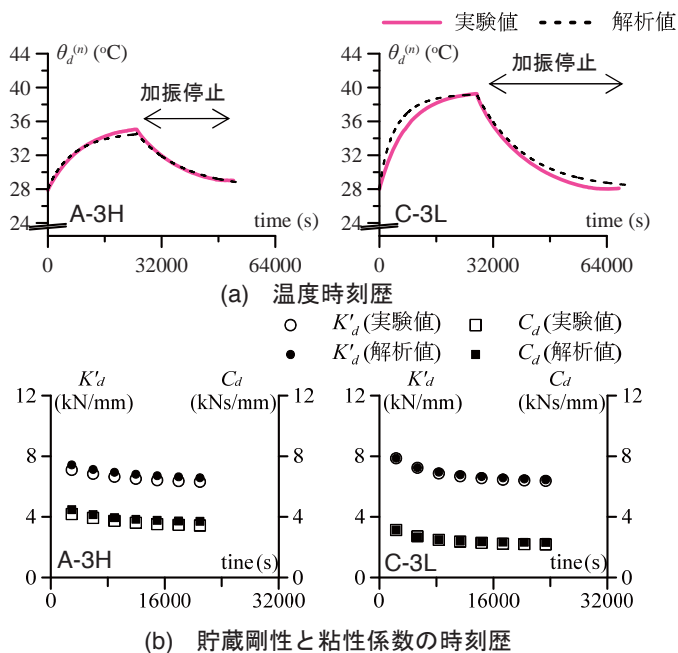


図8 置換正弦波での実験値と解析値の比較

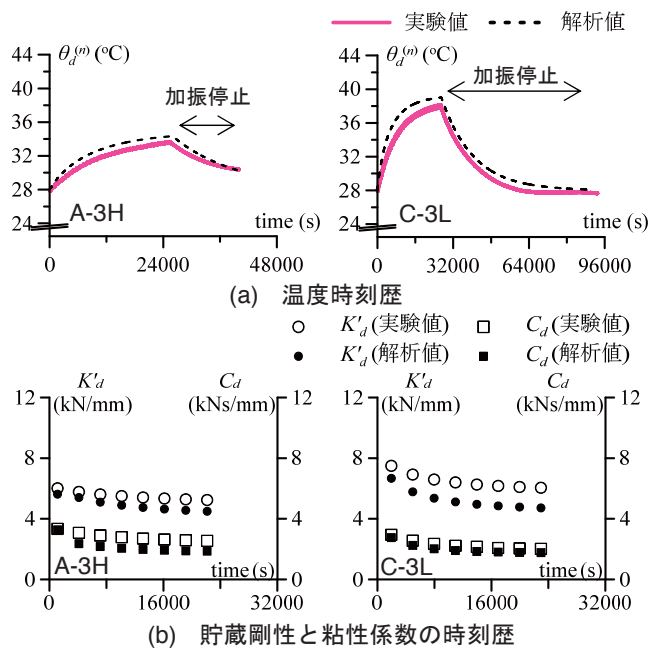


図9 風応答波での実験値と解析値の比較

#### 4. まとめ

本報では、実大粘弾性ダンパーを対象とした長時間風応答波加振実験を行いダンパー特性の変化を確認した。さらに、正弦波置換法<sup>2)</sup>の実大粘弾性ダンパーに対する適用性を検証した。また、長時間の繰返し加振による特性変化を再現できる新しい解析モデルを提案した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 置換正弦波と風応答波実験の温度上昇やダンパー特性値の変化は概ね良い対応を示していることが確認できた。
- (2) 長時間の繰返し加振による損失係数の変化を累積エネルギー吸収密度に比例するようにモデル化し、さらに熱の伝導・伝達による放熱をモデル化した解析モデルにより、実験で得られた粘弾性ダンパーの温度や動的特性の変化を良く再現できることを示した。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 佐藤大樹, 所健, 笠井和彦, 北村春幸: 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, 日本建築学会構造系論文集, 第80巻, 第710号, pp.571-581, 2015.4
- 4) 笠井和彦, 所健: 粘弾性体の温度・振動数・振幅依存性を考慮した構成則 (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
- 5) 佐藤大樹, 笠井和彦, 杉山暢方, 松田和浩: 実大粘弾性ダンパーの風応答時における簡易性能評価実験, 日本風工学会誌, 第40巻 第2号 No143, pp.189-190, 2015.4
- 6) 佐藤大樹, 杉山暢方, 笠井和彦, 松田和浩: 長時間の風外力における実大粘弾性ダンパーの解析手法の提案, その1 E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その115, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.795-796, 2015.9
- 7) 杉山暢方, 笠井和彦, 佐藤大樹, 松田和浩: 長時間の風外力における実大粘弾性ダンパーの解析手法の提案, その2 E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その116, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.797-798, 2015.9
- 8) 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
- 9) 杉山暢方, 笠井和彦, 佐藤大樹, 松田和浩: 長時間の風外力における実大粘弾性ダンパーの特性評価実験, その2, 風応答波によるダンパー動的特性の変化および正弦波置換法の検証, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.265-268, 2015.3