

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title	
著者(和文)	杉山暢方, 笠井和彦, 佐藤大樹, 松田和浩
Authors	Nobumasa Sugiyama, KAZUHIKO KASAI, Daiki Sato, Kazuhiro Matsuda
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2015, 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/110009947867">http://ci.nii.ac.jp/naid/110009947867</a>

## 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

構造—振動

正会員 ○ 杉山暢方<sup>\*1</sup>  
" 佐藤大樹<sup>\*3</sup>正会員 笠井和彦<sup>\*2</sup>  
" 松田和浩<sup>\*4</sup>実大粘弾性ダンパー 風外力 正弦波置換法  
温度分布 熱の伝導・伝達 動的特性の変化

## 1. はじめに

その1では、特性の異なる4種類の風応答波形を用いて、長時間の風応答波加振での実大粘弾性ダンパーの温度変化を実験的に確認した。そこでその2では、ダンパー特性の変化を実験的に確認することを目的とする。また、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<sup>1)</sup>の実大ダンパーに対する適用性を実験的に検証する。

## 2. 貯蔵剛性と粘性係数の算出方法

本章では、ダンパーの動的特性である貯蔵剛性  $K'_d$  と粘性係数  $C_d$  の算出方法について述べる。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(1)の最小二乗法によって求めた<sup>2)</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(2)の最小二乗法により求められる<sup>1)</sup>。

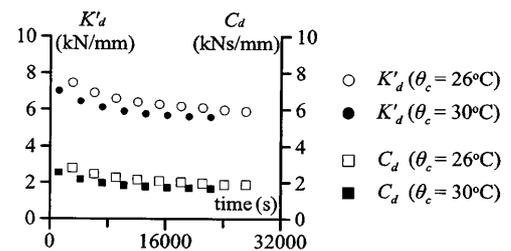
$$K'_d = \frac{n \sum u_{d,i} F_{d,i} - \sum u_{d,i} \sum F_{d,i}}{n \sum u_{d,i}^2 - (\sum u_{d,i})^2} \quad (1)$$

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

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、実载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。次章以降で示す  $K'_d$  と  $C_d$  の時刻歴図には代表値として、3,000秒ごとの履歴から算出した値を示している。

3. 貯蔵剛性  $K'_d$  と粘性係数  $C_d$  の変化3.1 周辺温度の違いによる  $K'_d$  と  $C_d$  の比較

本節では、入力波が同じ条件において、ダンパー周辺温度  $\theta_c$  が異なる場合の貯蔵剛性  $K'_d$  と粘性係数  $C_d$

図1 A-3L 長時間風応答波実験での  $K'_d, C_d$  の変化

の違いを確認する。ここでは、A-3Lにおいて、 $\theta_c = 26^\circ\text{C}$  と  $\theta_c = 30^\circ\text{C}$  の比較をそれぞれ行う。

図1にA-3L風応答波実験における、貯蔵剛性  $K'_d$  と粘性係数  $C_d$  の時間変化を示す。図1より、風応答波による長時間の加振では加振開始から  $K'_d$  と  $C_d$  が徐々に低下するが、载荷停止時間の付近ではダンパー特性の低下が緩やかになっていることが確認できる。これは、風応答波による加振において、ダンパー温度の上昇が途中から緩やかになることから(本報その1)、温度依存性により貯蔵剛性  $K'_d$  と粘性係数  $C_d$  も低下が緩やかになったと考えられる。

また、図1において、同時刻における貯蔵剛性  $K'_d$  と粘性係数  $C_d$  を比較すると、 $\theta_c$  の高い方が  $K'_d$  と  $C_d$  はわずかに低いことが分かる。このことは、次節の図2でも確認できる。これは  $\theta_c$  が高いほど熱伝達による放熱量が小さくなり、粘弾性ダンパーの温度は高くなることで  $K'_d$  と  $C_d$  が低下するためと考えられる。

3.2 風力の違いによる  $K'_d$  と  $C_d$  の比較

本節では、建物の減衰定数と  $\sigma_u$  が同じで、ダンパー周辺温度  $\theta_c$  が概ね等しい条件において、風力が異なる場合の貯蔵剛性  $K'_d$  と粘性係数  $C_d$  の違いを確認する。ここでは、建物の減衰が10%の場合を対象に、 $\theta_c = 24^\circ\text{C}$  で風方向風力であるA-3Hと風直交方向風力であるC-3Hの比較を行う。同様に、 $\theta_c = 28^\circ\text{C}$  でA-3HとC-3Hの比較を行う。ここで、本報その1表2より、 $N_0^+$  はA-3HとC-3Hでそれぞれ107, 108であり、概ね等しい。

図2(a)より、载荷時間における  $K'_d$  と  $C_d$  を比較すると、風方向時よりも風直交方向時の方が  $K'_d$  と  $C_d$  は多少大きいことが分かる。しかし、その差はわずかであ

ることから、 $\theta_c$ と建物の減衰定数および $\sigma_u$ が等しい場合、風方向風力時と風直交方向風力時では $K'_d$ と $C_d$ はほぼ同じであると思われる。この傾向は、図2(b)でも同様である。粘弾性ダンパーの発熱量は振動数に依存するが、A-3HとC-3Hにおいて、 $N_0^+$ はほぼ同値である(その1表2.2参照)。そのため、温度上昇量の差はわずかとなり、 $K'_d$ と $C_d$ に違いが見られなかったものと思われる。

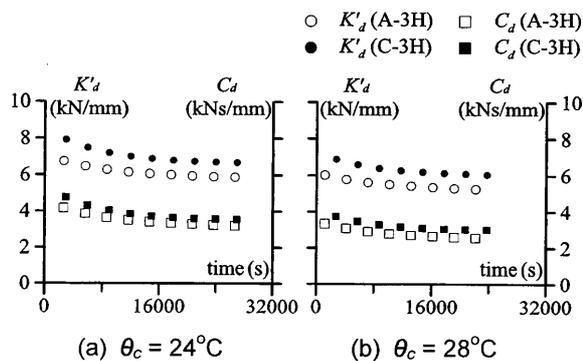


図2 A-3H, C-3Hにおける $K'_d, C_d$ の変化

### 3.3 建物の減衰定数の違いによる $K'_d$ と $C_d$ の比較

本節では、風力および $\sigma_u$ が同じで、ダンパー周辺温度 $\theta_c$ が概ね等しい条件において、建物の減衰定数が異なる場合の貯蔵剛性 $K'_d$ と粘性係数 $C_d$ の違いを確認する。ここでは、 $\theta_c = 28^\circ\text{C}$ でのC-3LとC-3Hの比較を行う。ここで、本報その1表2より、 $N_0^+$ はC-3LとC-3Hでそれぞれ173, 108であり、C-3Lの方がC-3Hよりも約1.6倍多い。

図3より、载荷時間における $K'_d$ と $C_d$ を比較すると、 $K'_d$ は両実験で概ね等しく、 $C_d$ はC-3Hの方が多少大きいことが分かる。 $N_0^+$ はC-3Lの方がC-3Hよりも多く(本報その1表2参照)、粘弾性ダンパーの振動数依存性により、C-3Lの $K'_d$ と $C_d$ は高くなる。しかし、 $N_0^+$ が多いことは単位時間当たりのサイクル数が多くなることに繋がり、その分ダンパーの温度上昇量は増える(本報その1図8参照)。よって、粘弾性ダンパーの温度依存性により、C-3Lの $K'_d$ と $C_d$ は低くなる。以上のようなトレードオフの関係により両実験での $K'_d$ が概ね等しくなったと考えられる。

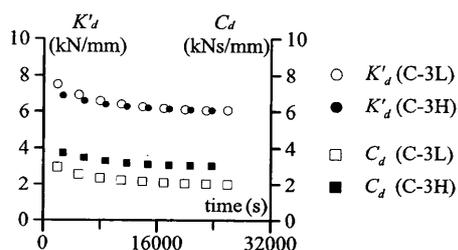


図3  $\theta_c = 28^\circ\text{C}$ における $K'_d, C_d$ の変化

## 4. 置換正弦波の作成方法

### 4.1 風応答波の正弦波置換法

ダンパー変形の標準偏差 $\sigma_u$ 、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。そこで文献1)において、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ことを期待し、正弦波置換法を提案している。

以下に、正弦波置換法について述べる。置換振動数 $f_r$ および置換振幅 $A_r$ は、風応答波のダンパー変形の繰返し数 $N_0^+$ 、継続時間 $t_a$ およびダンパー応答の標準偏差 $\sigma_u$ を用いて次式より算出される。

$$f_r = N_0^+ / t_a, \quad A_r = \sqrt{2} \sigma_u \quad (3a, b)$$

以上の方法により、4種類の風応答波表(本報その1表2参照)に対する置換振幅および置換振動数を求めた(表1)。なお、置換正弦波実験は、風応答波実験と同様に長時間载荷しており、最長で約9時間となった(表2)。

表1 置換正弦波の諸元

Case	$A_r$ (mm)	$f_r$ (Hz)	$u_d$ Max (mm/s)
A-3L		0.277	9.84
A-3H (C-3H)	5.66	0.142	5.05
C-3L	5.66	0.230	8.18

表2 置換正弦波载荷時間

Case	ダンパー 周辺温度 $\theta_c$ ( $^\circ\text{C}$ )	実载荷時間 $t'_L$ (sec)	平衡時間 $t_e$ (sec)	载荷時間 $t_L$ (sec)
A-3L	26	24,000	1,204	22,796
	30	28,800	2,936	25,864
A-3H (C-3H)	24	32,400	1,414	30,986
	28	30,000	5,058	24,942
C-3L	28	30,000	2,660	27,340

## 5. 風応答波の実験結果

### 5.1 ダンパー内部温度の変化

本章では、風応答波加振実験と置換正弦波加振実験により得られたダンパー温度の時間変化を比較し、正弦波置換法の妥当性を実験的に検証する。

図4に置換正弦波による実験により得られたB-B'断面左側上段の温度時刻歴を風応答波実験の結果に重ねて示す。

図4の(f)において風応答波と置換正弦波の最高温度

の比較を行うと、風応答波の ch3 の最高温度は 33.1°C に対し、置換正弦波の ch3 の最高温度は 33.4°C であり、概ね等しい。同様に、ch1,2 においても両実験での最高温度の差は微小であった。また、それ以外の実験ケースでは図 4(f) と比べて両実験での最高温度の差は大きくなるが、両実験での最高温度の差は 2°C 以下であることが確認できた。

以上のことから、実験ケースによっては多少の誤差はあるものの、置換正弦波と風応答波実験における粘弾性ダンパーの温度上昇は概ね良い対応を示していることが確認できる。

## 5. 2 貯蔵剛性および粘性係数の変化

本章では、風応答波加振実験と置換正弦波加振実験により得られた貯蔵剛性  $K'_d$  と粘性係数  $C_d$  の時間変化を比較し、正弦波置換法の妥当性を実験的に検証する。

図 5 に風応答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。図 5(a), (b) から、A-3L 実験において置換正弦波実験での  $K'_d$  の値が風応答波実験より最大で約 1.1 倍高いが、 $C_d$  においては両実験でその差は微小である。一方、図 5(c), (d) より、A-3H 実験において置換正弦波実験での  $K'_d$  の値がランダム波実験より最大で約 1.2 倍、 $C_d$  で約 1.3 倍と A-3L 実験に比べて高いことが確認できる。これは風力の準静的成分（低振動数成分）の影響<sup>3)</sup>によるものと考えられる。

図 6(a), (b) に A-3H 実験のある計測時刻における 400 秒間の履歴を風応答波と置換正弦波実験で並べて示す。図 6(a) 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ため、風方向のダンパー変位に含まれる準静的成分も多くなる。さらに、準静的成分は建物の減衰によってほとんど変化しない値であるため<sup>3)</sup>、固有振動数成分の小さくなる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。これらのことから、風方向かつ減衰の高い A-3H において式(1)および(2)より算出した風応答波実験の貯蔵剛性と損失係数が置換正弦波実験の値に比べ低い値となった。風力の準静的成分を考慮した置換正弦波の設定方法とダンパー特性の導出方法が必要である。

次に、風直交方向風力時における両実験での比較について述べる。図 5(e)~(g) より、C-3L, C-3H において、風応答波実験と置換正弦波実験で  $K'_d$  と  $C_d$  の差は最大でも 1 割程度となっており、概ね一致している。

以上のことから、風方向かつ建物の減衰が大きい場合において、 $K'_d$  と  $C_d$  に多少の誤差が生じるものの、正弦波置換法によって決定した振幅と振動数を用いた正弦波実験を行うことで、置換正弦波と風応答波実験

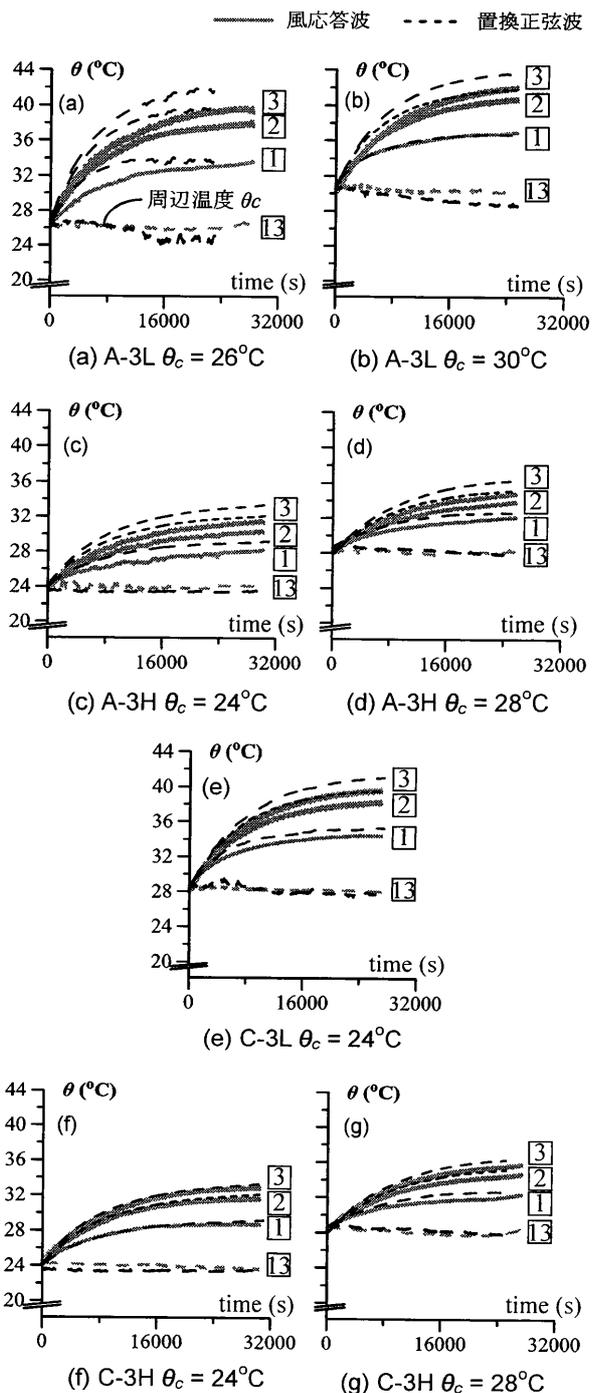


図 4 B-B'断面左側上段 風応答波と置換正弦波の温度時刻歴

により得られた  $K'_d$  と  $C_d$  は概ね良い対応を示していることが確認できる。

## 6. まとめ

本報その 2 では、特性の異なる 4 種類の風応答波形を用いて、ダンパーの動的特性の変化を実験的に確認した。また、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。得られた知見を以下に示す。

- ダンパーの貯蔵剛性  $K'_d$  と粘性係数  $C_d$  の低下量は温度上昇量と同様、時間経過とともに鈍くなることが分かった。
- 入力波が同じ場合、同時刻における  $K'_d$  と  $C_d$  を比較すると、ダンパー周辺温度  $\theta_c$  が高い方が  $K'_d$  と  $C_d$  は低くなる。 $\theta_c$  が高いほど熱伝達による放熱量が小さくなり、粘弾性ダンパーの温度は高くなる。その結果、 $K'_d$  と  $C_d$  が低下するためと考えられる。
- 建物の減衰定数と  $\sigma_u$  が同じで、 $\theta_c$  と繰返し数  $N_0^+$  は概ね等しく、風力が異なる A-3H と C-3H (本報その1 表2 参照) において、それぞれ  $K'_d$  と  $C_d$  を比較した結果、 $K'_d$  と  $C_d$  は A-3H と C-3H でほぼ同値となった。粘弾性ダンパーの発熱量は振動数に依存するため、温度上昇量の差は僅かとなり、A-3H と C-3H での  $K'_d$  と  $C_d$  に違いが見られなかったためと思われる。
- 風力と  $\sigma_u$  が同じで、 $\theta_c$  は概ね等しく、建物の減衰定数と  $N_0^+$  が異なる C-3L と C-3H (本報その1 表2 参照) においてそれぞれ  $K'_d$  と  $C_d$  を比較した結果、 $K'_d$  は C-3L と C-3H でほぼ同値となった。粘弾性ダンパーの振動数依存性により、C-3L の  $K'_d$  と  $C_d$  は高くなるが、同時に  $N_0^+$  が多いことにより温度上昇量は増え (本報その1 図8 参照)、粘弾性ダンパーの温度依存性により、C-3L の  $K'_d$  と  $C_d$  は低くなる。このようなトレードオフの関係により両実験での  $K'_d$  が概ね等しくなったと考えられる。
- 正弦波置換法により得られる置換正弦波での加振と風応答波加振での実験結果より、A-3H では温度・剛性・粘性係数を再現できなかった。この原因は風方向特有の周波数成分の影響に加え、高減衰により固有振動数成分が小さいためと考えられる<sup>4)</sup>。そのため、風力の準静的成分を考慮した置換正弦波の設定方法およびダンパー特性の評価方法の改善案が必要である。

参考文献

- 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
- 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
- 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

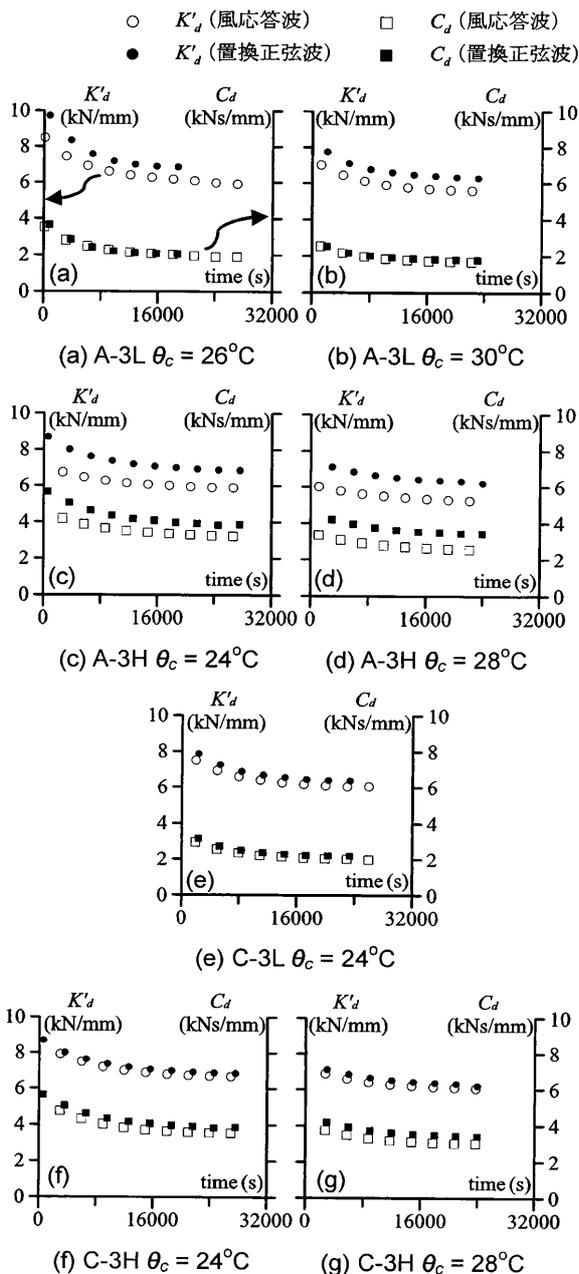


図5 風応答波と置換正弦波での  $K'_d$ ,  $C_d$  の変化

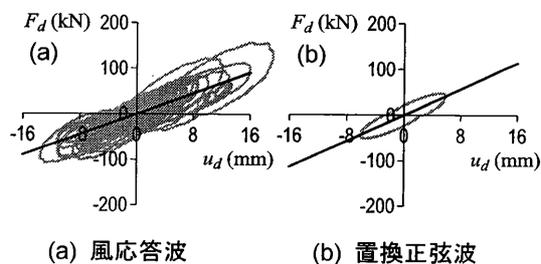


図6 特定の400秒間における荷重-変形関係 (A-3H 室温 28°C)

\*1 東京工業大学 大学院生  
 \*2 東京工業大学 建築物理研究センター 教授・Ph.D  
 \*3 東京工業大学 建築物理研究センター 准教授・博士(工学)  
 \*4 東京工業大学 建築物理研究センター 助教・博士(工学)