# T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

# 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	
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:http://ci.nii.ac.jp/naid/110009947867

# 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

#### 構造一振動

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  $K'_a$ はダンパー変形  $u_d$  - ダンパーカ $F_d$ 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  $\dot{u}_d$  - ダンパーカ  $F_d$ 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>。

$$K'_{d} = \frac{n \sum u_{d,i} F_{d,i} - \sum u_{d,i} \sum F_{d,i}}{n \sum u_{d,i}^2 - \left(\sum u_{d,i}\right)^2} \tag{1}$$

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

ここで、 $\Sigma$ は総和記号で、履歴のn個の $u_{di}$ または $\dot{u}_{di}$ と  $F_{di}$ 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。次章以降で示す $K'_{d} \ge C_{d}$ 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'<sub>a</sub>と粘性係数 C<sub>a</sub>の変化

#### 3.1 周辺温度の違いによる K'<sub>a</sub> と C<sub>a</sub>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 *θ*<sub>c</sub>が異なる場合の貯蔵剛性 *K*'<sub>d</sub>と粘性係数 *C*<sub>d</sub> 正会員 〇 杉山暢方<sup>\*1</sup> 正会員 笠井和彦<sup>\*2</sup> 〃 佐藤大樹<sup>\*3</sup> 〃 松田和浩<sup>\*4</sup>



#### 図1 A-3L 長時間風応答波実験での K'<sub>d</sub> C<sub>d</sub> の変化

の違いを確認する。ここでは、A-3L において、 $\theta_c = 26^{\circ}$ C と  $\theta_c = 30^{\circ}$ 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、載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  $K'_{a}$  と粘性係数  $C_{a}$  を比較すると、 $\theta_{c}$  の高い方が  $K'_{a}$  と  $C_{a}$  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  $K'_{a}$  と  $C_{a}$ が低下するためと考えられる。

### 3.2 風力の違いによる K'<sub>a</sub> と C<sub>a</sub>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、 $\theta_c = 24^{\circ}$ 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、 $\theta_c = 28^{\circ}$ 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、載荷時間における *K'*<sub>a</sub>と *C*<sub>a</sub>を比較する と、風方向時よりも風直交方向時の方が *K'*<sub>a</sub>と *C*<sub>a</sub>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、 $\theta_a$ と建物の減衰定数および $\sigma_n$ が等しい場合、風方向風力時と風直交方向風力時では  $K'_a \geq C_a$ 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、 $K'_a \geq C_a$ 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'a, Ca の変化

3.3 建物の減衰定数の違いによる K'<sub>a</sub> と C<sub>a</sub>の比較 本節では、風力およびσ<sub>a</sub>が同じで、ダンパー周辺温 度 θ<sub>c</sub>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'<sub>a</sub>と粘性係数 C<sub>a</sub>の違いを確認す る。ここでは、θ<sub>c</sub> = 28°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<sub>0</sub><sup>+</sup>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、載荷時間における $K'_{a} \geq C_{d}$ を比較すると、  $K'_{a}$ 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 $K'_{a} \geq C_{d}$ 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 $K'_{a} \geq C_{d}$ 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  $\theta_c = 28^{\circ}C$ 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 $\sigma_n$ 、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 り返し数  $N_0^+$ 、継続時間  $t_a$ およびダンパー応答の標準 偏差 $\sigma_n$ を用いて次式より算出される。

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

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 同様に長時間載荷しており、最長で約9時間となった (表 2)。

表1 置換正弦波の諸元

Case	<i>A</i> <sub>r</sub> (mm)	<i>f</i> <sub><i>r</i></sub> (Hz)	u <sub>d</sub> 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 置換正弦波載荷時間

Case	ダンパー 周辺温度 <i>θ<sub>c</sub></i> (°C)	実載荷時間 <i>t'<sub>L</sub></i> (sec)	平衡時間 t <sub>e</sub> (sec)	載荷時間 <i>t<sub>L</sub></i> (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<sup>\*</sup> 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℃ に対し、置換正弦波の ch3 の最高温度は 33.4℃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℃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'<sub>a</sub>と粘性係数 C<sub>a</sub>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  $K'_{a}$ と粘性係数  $C_{a}$ 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 $K'_{a}$ の値が風応答波実験より最大で約1.1倍高 いが、 $C_{a}$ 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  $K'_{a}$ の値がランダム波実験より最大で約 1.2 倍、  $C_{a}$ 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 一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  $K'_a \ge C_a$ 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'<sub>d</sub>と C<sub>d</sub>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  $K'_{u}$ 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。

- 1. ダンパーの貯蔵剛性 K'<sub>a</sub>と粘性係数 C<sub>a</sub>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'<sub>a</sub> と C<sub>a</sub>を比較すると、ダンパー周辺温度 θ<sub>c</sub>が高い方が K'<sub>a</sub> と C<sub>a</sub>は低くなる。θ<sub>c</sub>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'<sub>a</sub> と C<sub>a</sub>が低下するためと考えられる。
- 3. 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。
- 4. 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。
- 5. 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



\*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)