

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1, 風応答波によるダンパー内部温度の検討
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: http://ci.nii.ac.jp/naid/110009947866

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1 風応答波によるダンパー内部温度の検討

構造—振動

正会員 ○ 杉山暢方^{*1}
" 佐藤大樹^{*3}

正会員 笠井和彦^{*2}
" 松田和浩^{*4}

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

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に変換し、温度が上昇する。その温度上昇に伴い、ダンパーの抵抗力が低下する特性を有している（温度依存性）。また、風は継続時間が長いので、粘弾性ダンパーの温度上昇量は大きくなり、ダンパーへの影響が懸念される。以上のことから、長時間の風外力に対する粘弾性ダンパーの性能評価が求められている。

既往の研究では、小型の粘弾性ダンパーを対象とし、長時間の正弦波および風応答波の加振実験が行われ、動的特性の変化に加え、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する手法（正弦波置換法）の有効性が確認されている^{1),2)}。そこで本研究では、実大粘弾性ダンパーを対象とした加振実験を行い、長時間の風外力による温度・動的特性の変化を把握するとともに、正弦波置換法の妥当性を検証する。本報その1では、長時間の風応答波加振実験の概要説明と、ダンパー内部温度の変化に関する考察を行う。

2. 実験概要

2.1 試験体および計測概要

本研究で対象とする粘弾性ダンパー試験体を図1に、諸元を表1に示す。また、図2に本実験の試験体セットアップを、図3に計測箇所一覧を示す。図2、図3に書かれている数字は歪・温度における計測チャンネルの番号である。歪はA-A'断面で6箇所計測し(①~⑥)、温度はB-B'断面で12箇所、C-C'断面で10箇所とダンパー周辺温度の計23箇所(①~⑳)で計測した。

本実験ではダンパー温度 θ_d の初期温度を $22 \pm 1^\circ\text{C}$ とし、ダンパー周辺温度 $\theta_e = 24, 26, 28, 30^\circ\text{C}$ の4種類で実験を行った。なお、 θ_e の変化の幅は $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内となるように周辺温度をコントロールした。

2.2 風応答波作成手順および実験ケース

実験に用いるダンパー変形の風応答波時刻歴波形は1質点系モデルで風方向風力および風直交方向の風力時刻歴による時刻歴応答解析を行い、得られた変位波形を標準偏差が等しくなるように基準化して用いる。

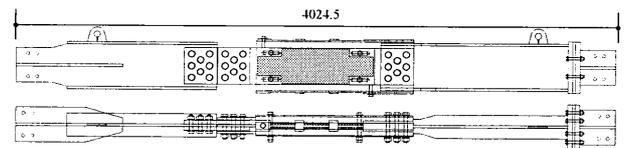


図1 粘弾性ダンパー試験体 (D2-3F) (単位: mm)

表1 試験体諸元

試験体名	L [mm]	A _s [mm ²]	t [mm]	n
D2-3F	4024.5	912000	8	6

L: ダンパー長さ A_s: 総せん断面積
t: 粘弾性体厚さ n: 粘弾性体積層数

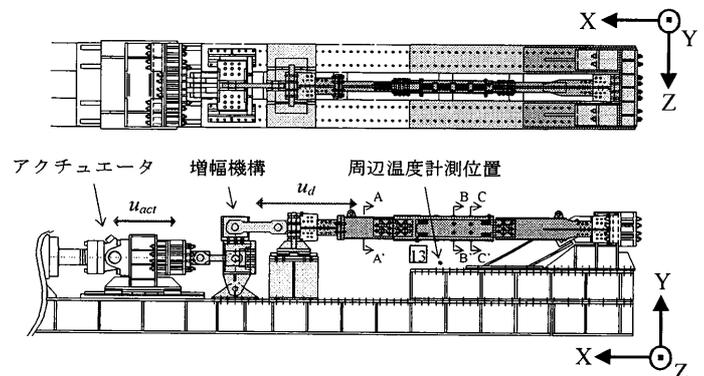


図2 実大粘弾性ダンパーのセットアップ (D2-3F)
(上側: 平面図、下側: 立面図)

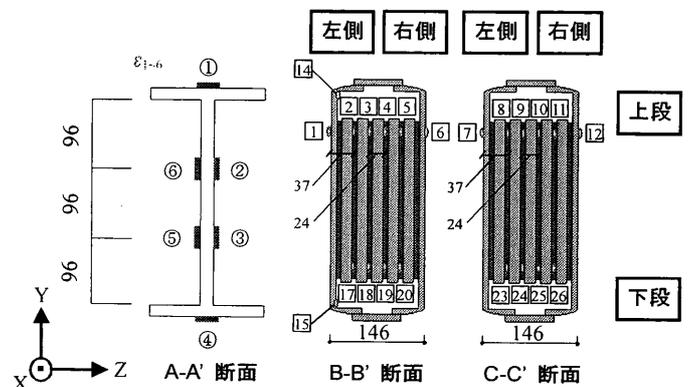


図3 試験体断面および歪・温度計測位置 (単位: mm)
(温度の計測チャンネル番号のうち、⑬, ⑲, ⑳は欠番)

時刻歴応答解析を行う際に解析モデルに与える風力時刻歴波形は、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としたパワースペクトル密度 (PSD) と一致するよう作成されている。解析モデルは、固有周期 $T_0 = 3$ 秒 ($f_0 = 0.33\text{Hz}$) に対して、減衰定数 ξ_0 を 2%, 10% (以降、建物の減衰定数とする) とした 2 種類の 1 質点モデルを用いた。この解析モデルに風方向および風直交方向の風力時刻歴波形を入力し、時刻刻み $\Delta t = 0.01$ 秒で時刻歴応答解析を行った。解析モデルの時刻歴変位の最大値は、0.08 ~ 0.15m 程度となっており、200m の建物において層間変形角は 1/2500 ~ 1/1300 程度となっている。その後、ダンパー最大変形が 16mm 程度の時刻歴波形を得るために、得られた変形時刻歴波形を、標準偏差 $\sigma_u = 4.0\text{mm}$ となるようにそれぞれ基準化した。これは、建物の階高を 4m、ダンパーをブレース型配置とした場合、0.5% 程度の建物の層間変形角におけるダンパー変形 (約 16mm) を想定したものである。解析は風方向、風直交方向ともに 750 秒 (1 区間) としている。

以上より得られた入力波 1 区間分の変位時刻歴を図 4、風応答波加振実験に用いたダンパー変形の統計値を表 2 に示す。ここで、表中の A = 風方向 (Along direction)、C = 風直交方向 (Across direction)、L = 低減衰 ($\xi_0 = 2\%$, Low damping)、H = 高減衰 ($\xi_0 = 10\%$, High damping)、数字は 1 質点モデルの固有周期を意味する。また、 $N_0^+ = 750$ 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)、PF = ピークファクター (= 最大値 / 標準偏差) である。

今回の実験では粘弾性ダンパーの温度上昇がある程度鈍くなるまで入力波 1 区間分を繰り返し入力している。表 3 に風応答波載荷時間を示す。ここで、実載荷時間 t'_L とは、実際に行った加振時間を意味する。平衡時間 t_e とは、ダンパー温度が周辺温度と等しくなるまでの時間を表す。載荷時間 t_L は実載荷時間から平衡時間を引いた値である。

表 2 風応答波の諸元

Case	u_d Max (mm)	u_d Min (mm)	σ_u (mm)	N_0^+	P.F.
A-3L	17.7	-14.1	4.0	208	4.42
A-3H	18.5	-12.7	4.0	107	4.64
C-3L	17.2	-15.9	4.0	173	4.29
C-3H	15.4	-15.2	4.0	108	3.85

表 3 風応答波載荷時間

Case	ダンパー 周辺温度 θ_c (°C)	実載荷時間 t'_L (sec)	平衡時間 t_e (sec)	載荷時間 t_L (sec)
	A-3L	26 30	30,000 28,800	1,878 3,778
A-3H	24 28	32,400	2,348 6,858	30,052 25,542
C-3L	28	30,000	3,046	26,954
C-3H	24 28	32,400	2,048 5,276	30,352 27,124

3 ダンパー内部温度の変化

3.1 計測位置による温度上昇の比較

本節では、粘弾性体の計測位置による温度上昇の違いを確認する。ここでは、C-3L ダンパー周辺温度 $\theta_c = 28^\circ\text{C}$ の実験ケースについて検討する。

図 5 に C-3L ダンパー周辺温度 $\theta_c = 28^\circ\text{C}$ における温度変化を示す。ここで、図 5(a) は B-B' 断面左側上段の温度時刻歴、図 5(b) は C-C' 断面左側上段の温度時刻歴、図 5(c) は B-B' 断面上段の温度分布、図 5(d) は B-B' 断面下段の温度分布である。なお、これ以降の時刻歴は全て載荷時間で表記する。

初めに、粘弾性体厚さ方向 (Z 方向) の温度上昇の違いについて考察する。図 5(a) より、ch3, 2, 1 の順に最高温度は $39.8, 38.4, 34.6^\circ\text{C}$ となっており、粘弾性体の温度 (ch2, 3) に比べて鋼材の温度 (ch1) は低いことが分かる。また、ch3 は粘弾性ダンパー中央の粘弾性体の温度であり、ch2 は粘弾性ダンパー外側にある粘弾性体の温度であることから、ダンパーの中心部に近いほど粘弾

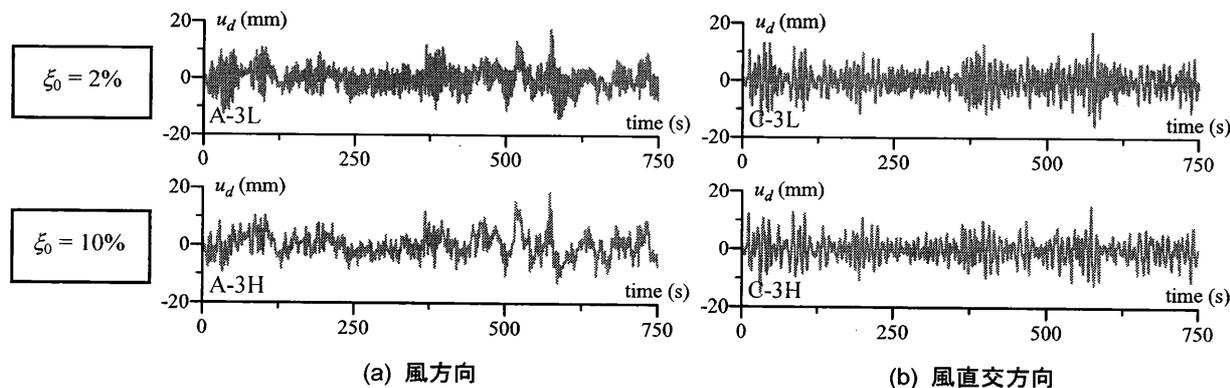


図 4 入力波の変位時刻歴 (1 区間分)

性体の最高温度は高くなる事が確認できる。また、図5(c),(d)を見ると、ダンパー中心である73mmを境に断面の左右で温度が概ね対称になっていることが確認できる。しかし、粘弾性体の温度差(ch2-5)はわずかであることから、粘弾性体の温度差はZ方向では小さいといえる。このことは、B-B'断面下側とC-C'断面上下、および他の実験ケースにおいても同様であった。本実験で使用したダンパーは、粘弾性体が6層であり、粘弾性体の間には厚さ16mm程度の鋼板が存在する(図3)。粘弾性体で発生した熱が鋼板で熱伝導されることによって粘弾性体の層毎の温度差が生じづらくなっていると考えられる。

次に、ダンパー長さ方向(X軸方向)の温度上昇の違いについて考察する。図5の(a)と(b)を比較すると、(a)のch3の最高温度は39.8°Cに対し、(b)のch9の最高温度は38.6°Cであり、(a)の方が最高温度はわずかに高いことが確認できる。また、(a)のch1と(b)のch7、(a)のch2と(b)のch8をそれぞれ最高温度で比較しても、同様の傾向が見られたことから、熱伝導・熱伝達の効果により、長さ方向中心部であるB-B'断面よりも外側にあるC-C'断面の方が温度は多少低い傾向にあると考えられる。しかし、こちらも先ほどと同様に粘弾性体部分での温度差はわずかであり、長さ方向も温度は概ね同様であると言える。このことは、他の計測位置および他の実験ケースにおいても同様であった。

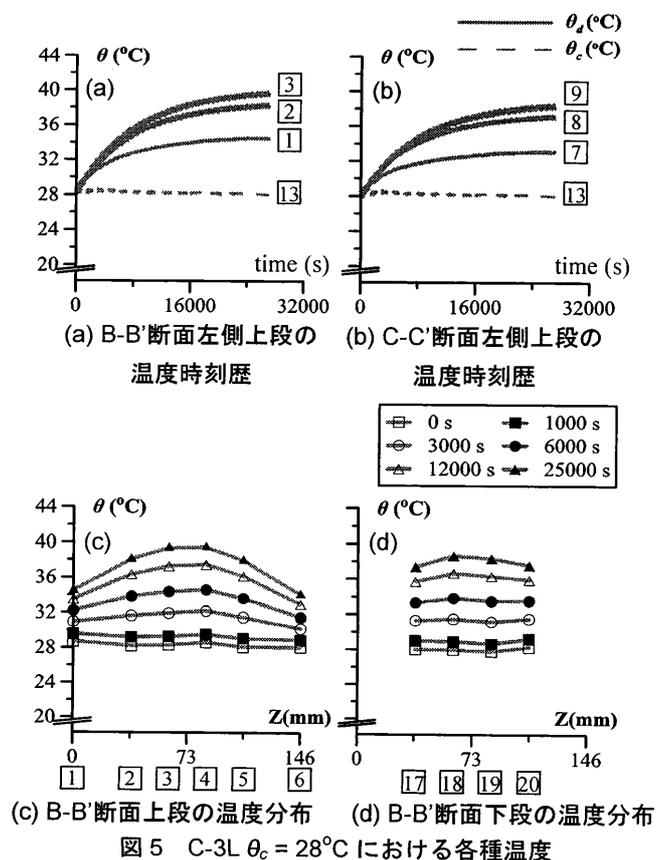


図5 C-3L $\theta_c = 28^\circ\text{C}$ における各種温度

更に、ダンパー断面鉛直方向(Y方向)の温度分布について検討する。図5(c),(d)を見ると、温度差はわずかであり、断面の上下で温度分布はほぼ一致していることが分かる。これらの傾向は、他の計測位置、断面および実験ケースにおいても同様であった。

以上より、実大粘弾性ダンパーにおいても粘弾性体内部の平面的な温度分布は同様であると見なす事ができることが分かった。

3. 2 周辺温度の違いによる温度上昇の比較

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_c が異なる場合のダンパー温度の違いを確認する。ここでは、A-3Lの実験において、 θ_c が 26°C と 30°C の比較を行う。

図6にA-3L B-B'断面左側上段における温度時刻歴を示す。(a)は $\theta_c = 26^\circ\text{C}$ の場合、(b)は $\theta_c = 30^\circ\text{C}$ の場合である。図6の(a)と(b)を比較すると、(a)のch3の最高温度は 39.9°C に対し、(b)では 42.2°C であり、(b)の方がch3の最高温度は高いことが確認できる。しかし、ダンパー初期温度からの温度上昇量で見ると、(a)のch3の温度上昇量は 13.3°C であるのに対し、(b)の方が 12.2°C と小さい。これらの傾向は、ch1, 2でも同様である。入力波が同じ場合、ダンパー周辺温度が高い方が、熱伝達による放熱量が小さくなるため、ダンパーの最高温度は高くなると考えられる。これらのことは、他の計測位置、他の実験ケースにおいても確認できた。

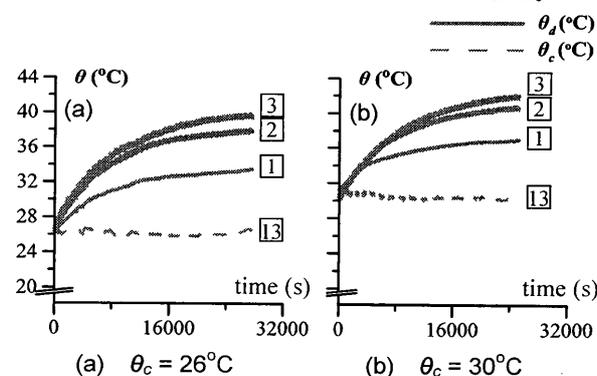


図6 A-3L B-B'断面左側上段における温度時刻歴

3. 3 風力の違いによる温度上昇の比較

本節では、建物の減衰定数と σ_n が同じで、ダンパー周辺温度 θ_c が概ね等しい条件において、風力の違いがダンパー温度に与える影響について検討する。ここでは、 $\theta_c = 24^\circ\text{C}$ で建物の減衰が10%の場合、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。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7に $\theta_c = 24^\circ\text{C}$ B-B'断面左側上段における温度時刻歴を示す。(a)はA-3H、(b)はC-3Hである。図7の(a)と(b)を比較すると、(a)のch3の最高温度は 31.6°C に対し、(b)では 33.1°C であり、(b)の方がch3の最高温度は

僅かに高いことが確認できた。また、ch1, 2でも(b)の方が最高温度は高く、他の計測位置、他の断面、他の実験でもC-3Hの方が最高温度は高いことが確認できたが、いずれも温度差は微小であった。粘弾性ダンパーの発熱量は振動数に依存する。今回は、A-3HとC-3Hにおいて、 N_0^+ は概ね等しいため(表2)、温度上昇量の差に違いが見られなかったものと思われる。

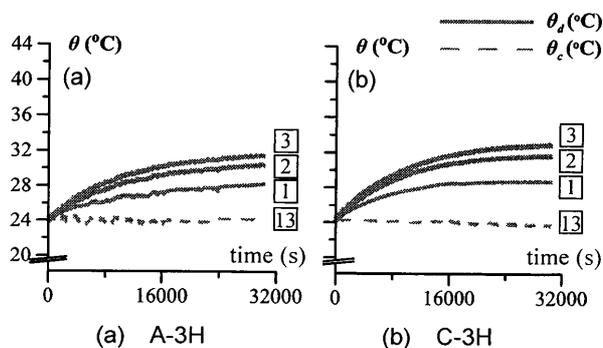


図7 $\theta_c = 24^\circ\text{C}$ B-B'断面左側上段における温度時刻歴

3. 4 建物の減衰定数の違いによる温度上昇の比較

本節では、風力と σ_w が同じで、ダンパー周辺温度 θ_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ダンパー温度の違いを確認する。ここでは、 $\theta_c = 28^\circ\text{C}$ の際のC-3LとC-3Hの比較を行う。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8にC-3Lダンパー周辺温度 28°C B-B'断面における温度変化図を示す。(a)はC-3L、(b)はC-3Hである。図8の(a)と(b)を比較すると、(a)のch3の最高温度は 39.8°C に対し、(b)では 35.9°C であり、(a)の方がch3の最高温度は高いことが分かった。また、ch1, 2でも(a)の方が最高温度は高く、他の計測位置、他の断面においてもC-3Lの方が最高温度は高いことが確認できた。表2から、繰返し数はC-3Lの方がC-3Hよりも多い。このことから、粘弾性ダンパーの振動数依存性により、単位時間当たりのサイクル数、つまり N_0^+ が多いC-3Lで発熱量が多くなるためと考えられる。

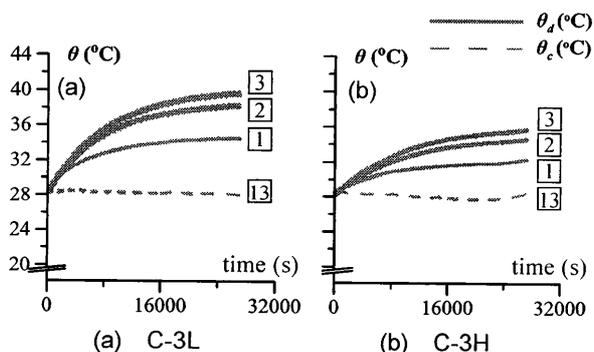


図8 $\theta_c = 28^\circ\text{C}$ B-B'断面左側上段における温度時刻歴

4. まとめ

長時間の風応答波加振実験を行い、ダンパー内部温度の変化に関する考察を行った。以下に、得られた知見を示す。

- 粘弾性体の温度はダンパー長さ方向(X方向)、ダンパー断面鉛直方向(Y方向)によらず概ね一様であり、粘弾性体厚さ方向(Z方向)の温度差は小さいことが分かった。この傾向は、他の計測位置、他の実験でも確認できた。これは、鋼板が粘弾性体間に複数層含まれていることにより、粘弾性体で発生した熱が鋼板で熱伝導され、粘弾性体の層毎の温度差が生じづらくなっているためと考えられる。
- 入力波が同じ場合、ダンパー周辺温度 θ_c が高い方が、熱伝達による放熱量が小さくなるため、ダンパーの最高温度は高くなると考えられる。
- 建物の減衰定数と σ_w が同じで、 θ_c と繰返し数 N_0^+ が概ね等しいA-3HとC-3H(表2参照)において、粘弾性ダンパーの温度上昇はほぼ同じであった。この傾向は、他の計測位置、他の断面、他の実験ケースにおいて
- も確認できた。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^+ はほぼ同値であるため、温度上昇量の差に違いが見られなかったものと思われる。
- 風力と σ_w が同じで、 θ_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においてダンパー温度を比較した結果、C-3Lの方がダンパーの温度上昇は大きいことが分かった。表2から、 N_0^+ はC-3Lの方がC-3Hよりも多い。これは、粘弾性ダンパーの振動数依存性により、単位時間当たりのサイクル数が多いC-3Lで発熱量が多くなるためと考えられる。

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
- 田上高行, 佐藤大樹, 所健, 北村春幸, 笠井和彦: 長時間ランダム振動実験に基づく粘弾性ダンパーの特性変化に関する研究, 日本建築学会大会学術講演論文集, B-2, pp539-540, 2010.9

*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)