

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title	WIND TUNNEL TESTS OF RESPONSE PROPERTY FOR TALL BUILDING HAVING VISCOUS OR VISCO-ELASTIC DAMPER
著者(和文)	佐藤大樹, 田村哲郎, 笠井和彦
Authors	daiki sato, TETSURO TAMURA, KAZUHIKO KASAI
出典 / Citation	日本建築学会構造系論文集, Vol. , No. 617, pp. 95-102
Citation(English)	Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. , No. 617, pp. 95-102
発行日 / Pub. date	2007, 7
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/110006317799

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

WIND TUNNEL TESTS OF RESPONSE PROPERTY FOR TALL BUILDING HAVING VISCOUS OR VISCO-ELASTIC DAMPER

佐藤大樹*, 田村哲郎**, 笠井和彦***

Daiki SATO, Tetsuro TAMURA and Kazuhiko KASAI

This paper discusses the wind tunnel tests for a tall building model having either viscous or visco-elastic damper under the turbulent boundary layer flow. The wind tunnel tests are carried out either the across- or along-wind direction for the viscous and the visco-elastic damper systems, respectively. This wind test set-up includes a special measurement system to obtain the damper hysteretic loop, then the response property of damper and system are discussed by the referring to the obtained loop. In case of the severe wind speed, the response of visco-elastic system is smaller than the viscous system because the stiffness of visco-elastic damper contributes to the stiffness of system.

Keywords : passive control, viscous damper, visco-elastic damper, frequency sensitivity, wind tunnel tests, turbulent boundary layer flow
パッシブ制振, 粘性ダンパー, 粘弾性ダンパー, 振動数依存, 風洞実験, 境界層乱流

1. はじめに

1.1 背景

地震時や強風時の安全性を確保し、日常吹くような風に対する居住性の向上を目的として、近年建設されている多くの高層建築物に制振構造が採用されてきている^{1),2)}。現在多くの制振装置が開発・実用化されているが³⁾、そのなかでも粘弾性ダンパーは、風や交通振動等によって発生する微小変形から、大地震の非常に大きな変形まで安定したエネルギー吸収性能を発揮することが知られており^{4),5)}、地震と台風が多発する日本の高層建築物の制振に、粘弾性ダンパーを用いる利点は多い。しかし、地震に比べ継続時間が長く、かつ幅広い周波数成分を有する風力が作用した場合、温度・振動数依存性を有する粘弾性ダンパーが設置された制振構造の風応答特性については殆ど明らかにされていない^{6),7)}。

筆者らは文献5)において、粘弾性ダンパーを有する高層建築物の風応答を把握する目的として、風応答時においてもダンパー履歴を計測することができる風洞実験装置を開発した。この装置を用いて行った無風時の自由振動試験時の履歴からダンパーの剛性や粘性を評価し、それらを用いてシステムの固有振動数や減衰定数を算定する手法を示した。また、一様流中での空力振動実験より、渦励振時の風応答はシステムの固有振動数での正弦波応答となるため、定常振動時の理論を用いて風応答時のダンパーおよびシステムの動的特性を応答時のダンパー履歴より算定し、それらが自由振動試験での値と一致することを確認した。さらに、粘弾性体部分を分数微分構成則⁸⁾でモデル化した3次元有限要素解析により、振動時のダンパ

一の剛性や温度を精度良く再現できることを確認した。

以上のような基礎的な研究を踏まえて、本論文では都市に建設された高層建築物に作用する風のように、地上付近で風速が減速し、かつ十分な乱れを有する境界層乱流中での風洞実験を行う。風方向風力は気流の乱れによる変動成分の他に平均成分を有し、風方向の変動風力のスペクトルは建物より低振動数側にパワーを有する広帯域な形状となる。一方、風直角方向での風力のスペクトルは、ピークを有する比較的狭帯域ものとなる。このような境界層乱流中における、温度・振動数依存性を有する粘弾性ダンパーを設置した高層建築物の風応答を、風洞実験により検討した例⁷⁾は殆どない。

1.2 本論文の目的および構成

本論文では、境界層乱流中における粘性および粘弾性ダンパーを有する高層建築物の風応答、特にダンパーの振動数依存性が応答に与える影響を明らかにすることを目的とする。そこで、エネルギー吸収により粘弾性体の温度が上昇し、ダンパー特性が変化することを避けるため、温度制御手法⁹⁾を用いて粘弾性体が風速や振幅によらず特定の温度となるように実験を行う。なお、粘弾性ダンパーの温度上昇が風応答に与える影響については、今後の課題とする。

以下に、本論文の構成を述べる。2章では、実験装置、計測手法、境界層乱流の作成方法および気流計測結果について述べる。3章では、自由振動試験に基づき、粘性・粘弾性ダンパーの振動数依存性の違いについて述べる。4章では、粘性および粘弾性ダンパーを用いた風直角方向・風方向での空力振動実験に基づき、両ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響について議論する。

* 東京工業大学都市地震工学センター 研究員・博士(工学)

** 東京工業大学環境理工学創造専攻 教授・工博

*** 東京工業大学建築物理研究センター 教授・Ph. D.

Researcher, Center of Urban Earthquake Eng., Tokyo Institute of Tech., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Environmental Science and Tech., Tokyo Institute of Tech., Dr. Eng.
Prof., Structural Eng. Research Center, Tokyo Institute of Tech., Ph. D.

2. 実験装置および境界層乱流の概要

2.1 風洞実験装置の概要

図1に、建物模型のロッキング振動に伴い駆動する粘性および粘弾性ダンパーを設置した風洞実験装置⁹⁾を示す。以降、それぞれを粘性システム、粘弾性システムと呼ぶ。建物模型には、幅 $B=50$ mm, 奥行き $D=50$ mm, 高さ $H=300$ mm のバルサ材を用いた。なお、振動の自由度は1方向のみであり、風直角方向の実験時には風方向を固定し、風方向の実験時には実験装置を90度回転させる。図1(a)は、風直角方向実験時の設置状況である。建物の剛性を模擬するコイルバネには、バネ定数 $K_s=9.42$ N/mm, 2.36 N/mm の2種類を使用し、それぞれを硬バネ、柔バネと呼び、それらのコイルバネを用いた実験装置をそれぞれ硬バネタイプ、柔バネタイプと呼ぶ。

粘性ダンパーは、建物模型の真下に設置され(図1(a))、円盤が建物模型のロッキングに伴いシリコンオイルの入ったシャーレ内を移動する際にダンパー力を発生する(図1(b))。粘性システムの減衰定数 ξ_{eq} は、シリコンオイルの量および動粘度を変えて調節する。

粘弾性ダンパーは、厚さ3mmのアルミ板(上板、下板)の間に $B_s, D_s, H_s=3$ mm, 5 mm, 8 mm の粘弾性体(住友スリーエム:ISD112)が挟まれた形状となっている(図1(b))。ダンパーはコイルバネと同じ高さに設置されている(図1(a))。模型のロッキング振動に伴う上下のアルミ板間の相対変位によって粘弾性体に変形が生じ、ダンパー力を発生する。空力振動模型による風洞実験では実建物の振動数

に比べ高い振動数で実験を行うため、粘弾性体の剛性は高くなり、実建物に用いた場合の剛性とは異なったものとなる。そこで、実建物の振動数での粘弾性体の材料特性との相似則を満たすために、「温度・振動数等価性」⁹⁾を利用し、粘弾性体を温めることで実験時の振動数においても等価なダンパー特性を得る。つまり、粘弾性システムの減衰定数 ξ_{eq} は、粘弾性体の温度を特定の温度まで温めることで調節する(温度制御手法⁹⁾)。粘弾性体温度が高くなるほど、コイルバネに対する相対的な剛性が低くなるため、システムに対するダンパーの寄与ひいては ξ_{eq} が小さくなる。粘弾性体の温度は実験装置内におかれた2個の電球の電力を調節して制御する。粘弾性システムの実験装置は保温のためナイロン袋で覆われている⁹⁾。

2.2 計測方法

粘性ダンパーの変形は円盤の変位、粘弾性ダンパーの変形は上板の変位と定義し、それぞれを変位計測位置(図1)での計測値から、幾何学的関係を用いて算出した。また、粘性および粘弾性ダンパーのダンパー力は、ダンパーに締結した2つのロードセル(図1)で計測した。粘弾性体の表面温度はサーモセンサーで、ダンパー周辺温度は熱電対で計測した。なお、粘弾性体の内部と表面温度には殆ど差が無いことを、3次元有限要素解析により確認している⁹⁾。変動風速の測定には1型熱線流速計を用いた。平均風速は模型頂部高さに設置したピトー静圧管で計測した。

サンプリング周波数は、硬バネタイプで2,500Hz, 柔バネタイプで1,250Hzとし、ダンパーを設置しない状態⁹⁾(以下、非制振システム)での固有振動数 f_0 (3.2節)に対し、それぞれ約140倍となるようにした。また、ローパスフィルターを行う振動数もそれぞれの f_0 に対し約2.5倍⁹⁾とし、硬バネタイプでは45Hz, 柔バネタイプでは22.5Hzとした。フィルター操作の詳細については文献5付録Aを参照されたい。データ数は硬・柔バネタイプともに131,072とする⁹⁾。計測時間は、硬バネタイプで52.4288秒, 柔バネタイプで104.8576秒であり、実物換算で600秒に相当する波形が5波得られる。統計値は5回のアンサンブル平均値で評価する⁹⁾。

2.3 想定建物および縮尺率

本論文では、東京周辺で粗度区分IV⁹⁾に建てられた、高さ $H_p=120$ m, 平面が20m x 20mのアスペクト比6の超高層建物を想定し、1次固有周期を $T_p=0.03H_p$ より3.6秒 ($f_p=0.28$ Hz)とした。想定建物と実験模型の寸法の縮尺率 $\lambda_L (=H/H_p)$ は、 $\lambda_L=1/400$, 振動数の縮尺率 $\lambda_f (=f_0/f_p)$ は硬バネタイプで $\lambda_f=64.08$, 硬バネタイプでは $\lambda_f=32.04$ となる。風速の縮尺率 λ_u は、 $\lambda_u=\lambda_L \cdot \lambda_f$ で表され⁹⁾、硬バネタイプで $\lambda_u=0.1602$, 柔バネタイプでは $\lambda_u=0.0801$ となる。

文献9より求めた、東京周辺で粗度区分IVでの再現期間1年、100年、500年の実建物頂部での平均風速 U と無次元風速 V_r (式(1))、および硬・柔バネタイプの風洞実験の模型頂部での平均風速の関係を表1に示す。

$$V_r = U / (f_0 B) \tag{1}$$

表1 実風速と無次元風速および実験風速の関係

再現期間 (年)	実風速 (m/s)	V_r	実験風速 (m/s)	
			硬バネタイプ	柔バネタイプ
1	20.29	4.65	3.25	1.63
100	40.57	8.30	6.50	3.25
500	45.03	9.11	7.22	3.61

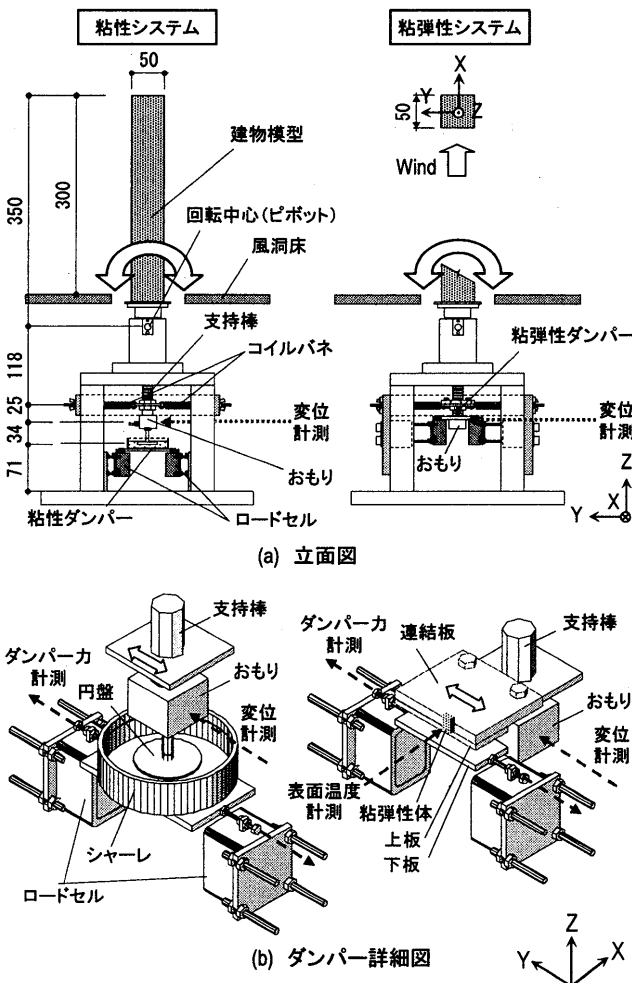


図1 風洞実験装置(風直角方向実験時, 単位:mm)

2. 4 境界層乱流の作成方法

実験には東京工業大学所有のエッフェル型風洞を用いた。測定断面は1.0m x 0.8m, 測定部長さは7.0mである。境界層乱流を作成するため、風洞内にラフネスブロック（以下、ラフネス）を千鳥状に配置した。ラフネスは2種類用いており、風上側1.0mの範囲は50mm x 50mm x 50mmのラフネスを、それ以降の風下側には25mm x 25mm x 25mmのラフネスを配置した。いずれの範囲においても粗度密度（=見付け面積の総和/床面積）は5%である。さらに、最も風上側に高さ500mmのスパイヤーと、高さ200mmのバリヤーを設置した。なお、模型位置での模型およびラフネスを含めた閉塞率は2.2%であった。

2. 5 境界層乱流の気流性状

模型位置と、模型位置から風方向および風直角方向に±4Bの位置で気流計測を行い、気流性状の空間依存性を確認する。また、風速は、 $V_r = 3, 5, 7, 9, 11$ で行い風速依存性も確認する。計測は全ての位置および風速で3回ずつ行い、そのアンサンブル平均値を用いる。

計測結果の例として、図2(a), (b)に、模型位置で計測した $V_r = 7$ での平均風速 U および乱れの強さ (σ_u/U ; σ_u = 風速の標準偏差) の鉛直プロファイルを示す。なお、図2(a)の横軸は、境界層高さ z_δ (= 550mm)での平均風速 U_δ で基準化されている。また、図2(a), (b)には $\alpha = 0.27$ (粗度区分IV) のべき乗則⁹⁾、孟らの結果¹⁰⁾ および模型高さ (=300mm) も併記している。

図2(a)の平均風速のプロファイルはべき乗則および孟らの結果と良い一致を示していることが確認できる。図2(b)の乱れの強さについても、べき乗則とは模型高さ以上の範囲でずれを生じているが、模型高さの範囲までは良い対応を示していることが確認できる。

図2(c)は $V_r = 7$, 模型位置、模型頂部高さでの変動風速の無次元化パワースペクトル密度 (以下、PSD) である。図中にはカルマン型の無次元化 PSD⁹⁾ も併記している。横軸の無次元化に用いた乱れのスケール L_x は⁸⁾⁹⁾、I型熱線風速計で計測した変動風速の自己相関係数より求め、 $L_x = 0.391$ mであった (実建物頂部高さ120mで156mに相当)。図2(c)より、実験より得られた PSD はカルマン型と良く一致していることが確認された。

他の計測位置および風速 ($V_r = 3 \sim 11$) においても作成した気流のプロファイルや乱れのスケール、スペクトルにバラツキは殆ど無く、空間依存性および風速依存性が無いことを確認した。

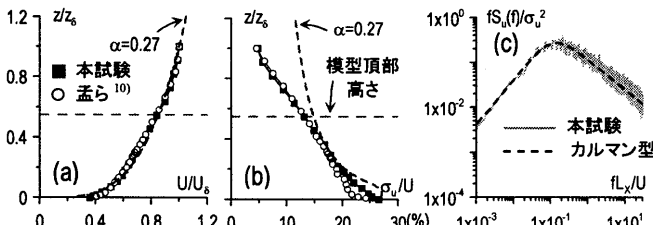


図2 気流性状:(a)平均風速,(b)乱れの強さ,(c)パワースペクトル密度

3. 自由振動試験

3. 1 目的および試験方法

自由振動試験を各ケースの空力振動実験の前後に行った。空力振動実験前の試験では、自由振動試験時の変形波形およびダンパー履歴から、システムやダンパーの特性を得ることが目的であり、空力

振動実験後の試験では、実験前のダンパー特性と比べてダンパー損傷の有無を確認することが目的である。粘弾性システムの自由振動試験は、粘弾性体の内部と表面の温度が均一となるように、少なくとも5分間は表面温度を一定に保持した後に行う。粘性・粘弾性システムともに自由振動試験は空力振動実験の前後で各3回行う。

自由振動時の履歴が減衰により徐々に小さくなることを考慮しながら⁹⁾、ダンパーの貯蔵剛性 K'_d と損失係数 η_d を次式より算出する。

$$K'_d = \frac{n \sum F_d^{(i)} u_d^{(i)} - \sum F_d^{(i)} \sum u_d^{(i)}}{n \sum (u_d^{(i)})^2 - (\sum u_d^{(i)})^2}, \quad \eta_d = \frac{E_D}{\pi K'_d (u_{d,max})^2} \quad (2a,b)$$

ここに、 Σ は総和記号であり1サイクル中でそれぞれ n 個の $F_d^{(i)}, u_d^{(i)}$ を対象とする。 E_D は1サイクル当たりのダンパーの吸収エネルギーを表し、履歴の面積より得られる。 $u_{d,max}$ はダンパー最大変形である。また、ダンパーの損失剛性 K''_d および粘性係数 C'_d は、求めた K'_d, η_d およびシステムの固有振動数 f_{eq} を用いて次式で算出できる^{2),5)}。

$$K''_d = \eta_d K'_d, \quad C'_d = K''_d / (2\pi f_{eq}) \quad (3)$$

ダンパーが振動数依存性を有する場合、システムの固有振動数も振動数依存性を有するため、その値は外力の周波数特性によって変化する^{11),12)}。よって、これと区別するため、特に自由振動試験より得たシステムの固有振動数を共振振動数 f_{eq} と呼ぶこととする¹¹⁾。

3. 2 自由振動試験結果

はじめに、非制振システムでの自由振動試験を行い、硬バネタイプでの固有振動数 $f_0 = 17.8$ Hz, 柔バネタイプで $f_0 = 8.9$ Hzを得た。また、両バネタイプともに非制振システムの減衰定数 $\xi_0 = 0.2\%$ であった。

次章で述べる空力振動実験では、質量減衰パラメータ δ を次式の如く設定して、風速を変化させて行う^{5),8)}。

$$\delta = \frac{\tilde{M}}{B^2 L_H \rho} \xi_{eq} = \frac{K_s L_s^2}{(2\pi f_0)^2 B^2 L_H^3 \rho} \xi_{eq} \quad (4)$$

ここで、 \tilde{M} = 一般化質量、 L_H = ピボットから模型頂部までの距離 (= 350mm)、 L_s = ピボットからコイルバネまでの距離 (= 118mm)、 ρ = 空気密度 (= 1.22kg/m³) である。本試験では、粘性・粘弾性システムで減衰定数 ξ_{eq} を変更して δ の設定を行った。

表2に、各 δ での自由振動試験より得られた f_{eq} および K'_d, K''_d を、 f_0 および K_s でそれぞれ基準化して示す。また、表2には、粘弾性体の表面温度も併せて示している。

粘性ダンパーは若干の剛性を有するが⁵⁾、その値は粘弾性ダンパーに比べると低く、粘性システムの剛性への寄与 (K'_d/K_s) はいず

表2 δ と ξ_{eq} およびダンパー特性の関係

		硬バネタイプ				柔バネタイプ			
δ		0.64	0.96	1.28	1.60	2.40	3.19	3.99	4.79
ξ_{eq} (%)		0.80	1.20	1.60	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
粘性	f_{eq}/f_0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	K'_d/K_s	0.004	0.004	0.006	0.007	0.005	0.007	0.008	0.010
	K''_d/K_s	0.010	0.018	0.026	0.034	0.058	0.079	0.100	0.120
粘弾性	f_{eq}/f_0	1.01	1.01	1.01	1.02	1.06	1.07	1.08	1.08
	K'_d/K_s	0.014	0.020	0.026	0.031	0.070	0.083	0.099	0.114
	K''_d/K_s	0.011	0.019	0.027	0.035	0.061	0.082	0.104	0.126
温度 (°C)		53.0	41.0	35.0	32.0	38.5	30.5	28.0	25.0

れの δ においても小さいため、 f_{eq}/f_0 が全ての δ で1となっている。

一方、粘弾性ダンパーは、粘性ダンパーに比べて顕著な剛性を有するため⁹⁾、システムの剛性に与える寄与は大きく、 $\delta=4.79$ のケースでは $f_{eq}/f_0=1.08$ となり、粘弾性システムの共振振動数は非共振システムに比べ8%上昇する。

3.3 ダンパーのモデル化および振動数依存性の確認

境界層乱流中では様々な振動数成分を有する広帯域な応答となるため、ダンパーの振動数依存性を事前に把握することが重要となる。

図3は、粘性ダンパーではシリコンオイルの状態を、粘弾性ダンパーでは温度を同じとし、硬バネタイプでの共振振動数 f_{eq} に対して、コイルバネを変更し、振動数を約0.5倍($f/f_{eq}=0.5$)、1.5倍($f/f_{eq}=1.5$)とした場合での自由振動試験より得られた K'_d および C'_d を、硬バネタイプでの K'_d 、 C'_d でそれぞれを基準化して示したものである。また、図中には、粘性ダンパーをMaxwellでモデル化(付録A参照)した場合の理論値(実線)と、粘弾性ダンパーを分数微分構成則(図中、FD)でモデル化(文献5参照)した場合の理論値(破線)も併記している。

図3より、粘性ダンパーと粘弾性ダンパーともに振動数が高くなるほど K'_d が大きくなること分かる。粘性ダンパーの振動数依存性は粘弾性ダンパーに比べ強いが、粘性ダンパーの K'_d は、前述したように値は小さいため、その変化がシステムに与える影響は小さい。また、粘性ダンパーは $f=0$ での剛性(以下、静的剛性)を有しないが、粘弾性ダンパーは静的剛性を有することも両ダンパーで異なる K'_d の特性である。粘性ダンパーの C'_d は振動数に依存せずほぼ一定値であるが、粘弾性ダンパーの C'_d は粘性ダンパーに比べ高振動数側では小さく、低振動数側では大きい。また、理論値(FD)によれば、さらに低振動数側で大きくなる振動数依存性を示す。

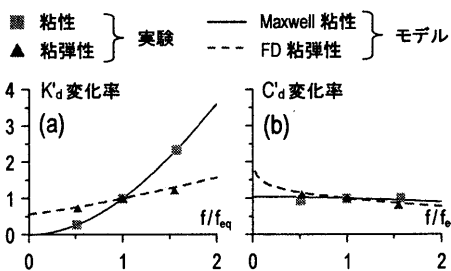


図3 ダンパーの振動数依存性の比較:(a) K'_d , (b) C'_d

4. 空力振動実験

4.1 応答曲線の比較

図4に、空力振動実験より得られた応答曲線を、質量減衰パラメータ δ (式(4))について、粘性システムと粘弾性システムで重ねて示す。図の横軸は無次元風速 V_r (式(1))、縦軸は模型回転角の標準偏差 ϕ_{rms} ($=\sigma_y/L_M$; σ_y = 変位計測位置での応答変位の標準偏差、 L_M = ピボットから変位計測位置までの距離

(=143 mm))である。

図4より、 $V_r=4$ 以降から応答が増大するが、一様流での実験⁹⁾のように明確な渦励振は発生せず、急激に応答が増大することはない。 δ の増加とともに応答が減少し、減衰の効果が大きいことが分かる。

減衰が小さい $\delta=0.64\sim 1.28$ のケースでは、粘性システムと粘弾性システムの違いは確認できない。一方、減衰が大きくなる $\delta=1.60\sim 4.79$ のケースでは、 $V_r=7$ 付近から粘弾性システムの応答は、粘性システムより小さくなっていることが確認できる。これは、高風速の場合に粘弾性ダンパーの剛性が発生することで、システムの剛性

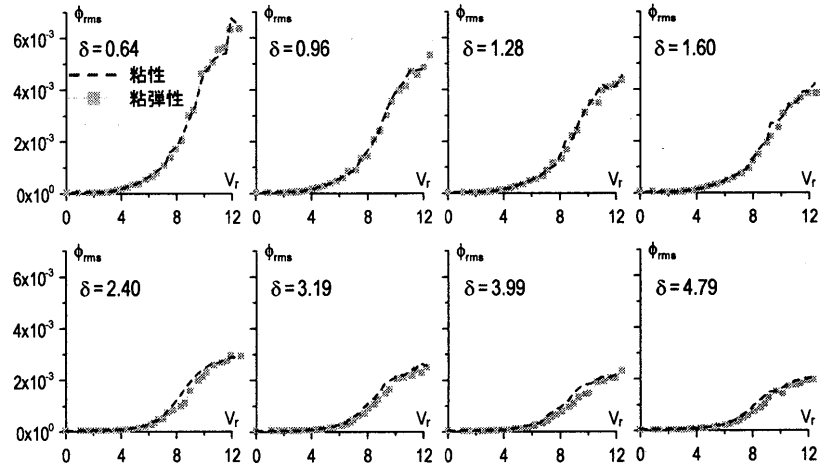


図4 風直角方向応答時の粘性システムと粘弾性システムの比較

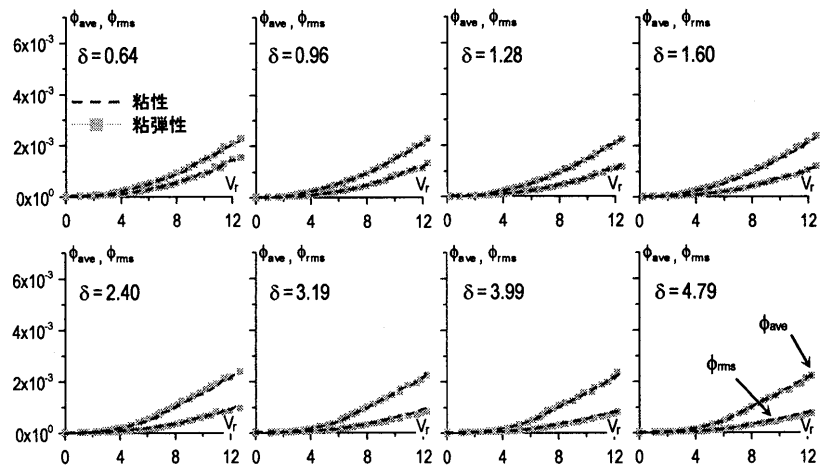


図5 風方向応答時の粘性システムと粘弾性システムの比較

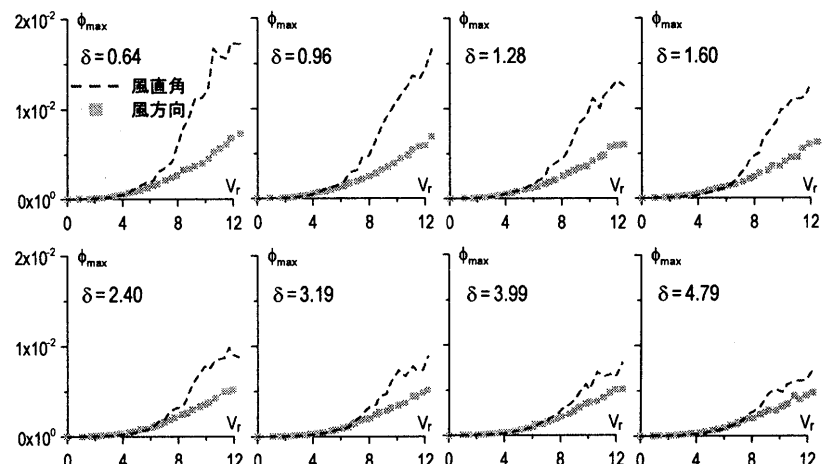


図6 粘弾性システムの風直角方向応答時と風方向応答時の最大値の比較

に寄与したためである(4.2節, 後述)。

図5(前頁)に、粘性および粘弾性システムでの風方向の応答曲線を示す。横軸は図4と同様に無次元風速 V_r であるが、縦軸は回転角の平均値 ϕ_{ave} と変動成分の標準偏差 ϕ_{rms} に分けて示している。

図5の $\delta=4.79$ と $\delta=0.64$ の回転角の平均値 ϕ_{ave} および標準偏差 ϕ_{rms} をそれぞれ比較すると、 ϕ_{ave} は静的な応答であり、減衰の効果を受けないため $\delta=4.49$ と $\delta=0.64$ で変化しないが、 ϕ_{rms} は減衰の効果により、 $\delta=4.79$ での ϕ_{rms} は $\delta=0.64$ での結果の約0.6倍となる。しかし、風直角方向(図4)の0.3倍と比べると、減衰の効果は小さい。

粘性システムと粘弾性システムの風方向実験の結果を比較すると、いずれの δ においても、粘性と粘弾性システムの結果に大きな違いは確認できない。粘弾性ダンパーは粘性ダンパーと異なり静的剛性を有するため、粘弾性システムの平均値 ϕ_{ave} が粘性システムより低減することが期待されたが、分数微分構成則より求めた粘弾性ダンパーの静的剛性は(3.3節)、硬パネの剛性の0.012倍、柔パネの剛性の0.046倍であり、システムの静的剛性への寄与は小さく、粘弾性システムと粘性システムの平均値 ϕ_{ave} に違いが現れなかった。

図6(前頁)に、風直角方向と風方向の、回転角の最大値 ϕ_{max} の比較を示す。ここでは例として粘弾性システムでの結果を示している。なお、風方向は平均成分を含んだ最大値である。 δ の小さいシステムの場合、風直角方向応答は $V_r=4$ 付近から応答が増大するが、風方向応答は緩やかに増加するため、 V_r が大きくなるにつれて風方向との違いが顕著となる。 δ を大きくすると、減衰の効果が大い

風直角方向は大きく低減するのに対し、風方向は平均成分を有するため応答の低減は小さく、両者の差は小さくなる。さらに δ を増加させた場合、風直角方向応答が風方向応答を下回ることが推測できるが、このことは、岡田らの弾塑性ダンパーでの空力振動実験において履歴減衰が増大した際に確認されている¹³⁾。

4.2 風応答時のダンパー特性の比較

以下に、応答時のダンパー履歴よりシステムの応答特性をより詳細に検討していく。なお、本試験装置は、建物模型とダンパーが剛な冶具で連結されているため、ダンパー変形と模型の変位には位相差はなく同じ特性を表す。

図7に粘性および粘弾性システムの風直角方向応答 $\delta=0.64, 4.79$ における、コイルパネ位置⁵⁾でのダンパー変形のPSD(単位: mm^2/s)、図8に最大値周辺での10/ f_0 秒間のダンパー変形-力の履歴を示す。それぞれの図において $V_r=4, 8, 12$ の結果を示している。なお、図7のPSDにおける横軸は、振動数 f を非制振システムの固有振動 f_0 で基準化して示しており、図中の一点鎖線は、 $f/f_0=1$ 、つまり非制振システムの固有振動数を意味する。

図7の粘性システムの $V_r=4$ でのPSDには $f/f_0=1$ 付近より低振動数側に建物から離脱する渦による強制振動成分があり、応答は低振動数成分を多く含む性状を示している。

さらに V_r が大きくなると、渦発生の振動数が高振動数側に推移して、固有振動数と一致することで応答が増大し、固有振動数成分が卓越する。 $\delta=0.64$ の場合は固有振動数成分に鋭いピークを有する

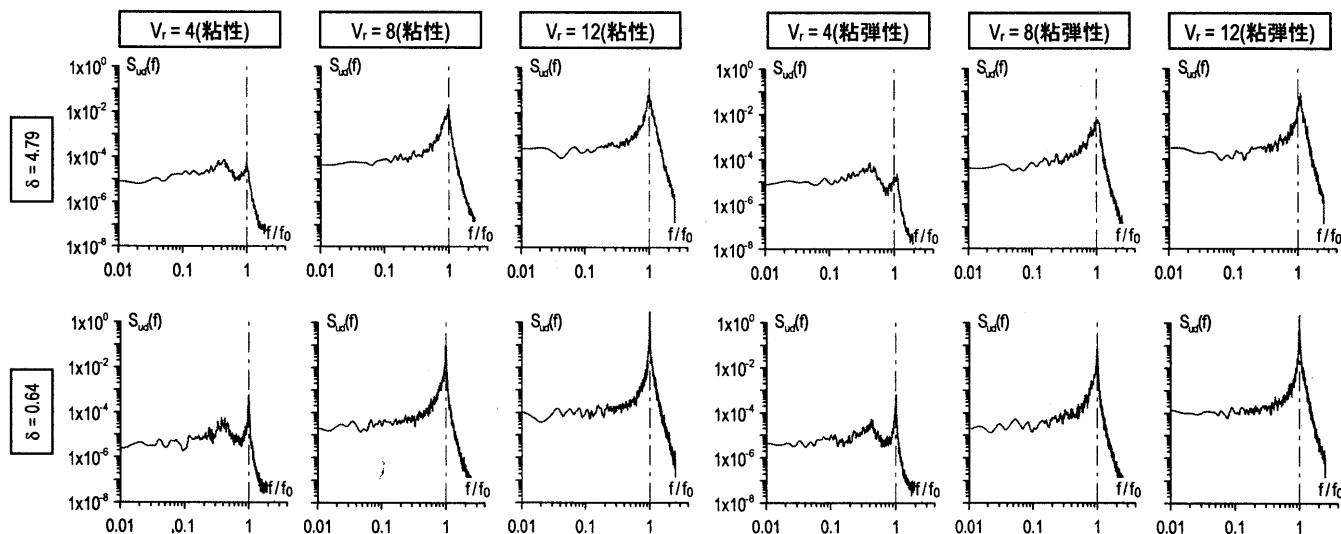


図7 風直角方向応答時の粘性および粘弾性ダンパー変形のパワースペクトル密度

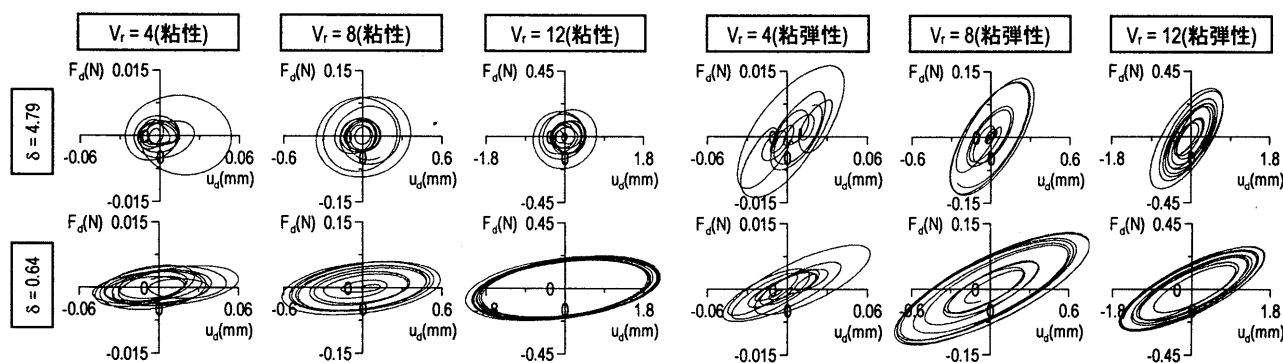


図8 風直角方向応答時の粘性および粘弾性システムのダンパー履歴

が、減衰の大きい $\delta = 4.79$ のシステムでは $\delta = 0.64$ に比べて固有振動数成分を中心に多少幅の広いピークを有する形状となる。

粘弾性システムについても粘性システムと同様の応答特性が確認できる。ただし、図8からも分かるように、粘弾性ダンパーの履歴は、粘性ダンパーに比べ顕著な傾き（剛性）を有しており、ダンパー剛性の寄与（3.2節）によりPSDの $\delta = 4.79$ でのピークは $f/f_0 = 1$ より高振動数側に推移していることが確認できる。

次に、風応答時のダンパー変形一力の履歴から、最小二乗法を用いて式(5a)より風応答時の等価な貯蔵剛性 K'_{dLS} を求める¹⁴⁾。また、ダンパー変形を時間微分して求めたダンパー速度一力の履歴から、式(5b)より風応答時の等価な粘性係数 C'_{dLS} を求める。

$$K'_{dLS} = \frac{n \sum u_{d,j} F_{d,j} - \sum u_{d,j} \sum F_{d,j}}{n \sum u_{d,j}^2 - (\sum u_{d,j})^2} \quad (5a,b)$$

$$C'_{dLS} = \frac{n \sum \dot{u}_{d,j} F_{d,j} - \sum \dot{u}_{d,j} \sum F_{d,j}}{n \sum \dot{u}_{d,j}^2 - (\sum \dot{u}_{d,j})^2}$$

ここに、 Σ は総和記号で、履歴の n 個の $u_{d,i}$, $F_{d,i}$ （または、 $\dot{u}_{d,i}$ ）を対象とする。このようにして求めた風応答時の粘性および粘弾性ダンパーの K'_{dLS} , C'_{dLS} を、 $\delta = 0.64$ および $\delta = 4.79$ の空力振動実験前に行った自由振動試験時の K'_d , C'_d でそれぞれを基準化（Wind/Free）したものを図9に示す。なお、図9の K'_{dLS} および C'_{dLS} は、実時間10分間に相当する履歴から求めた5回のアンサンブル平均値の変動係数（=標準偏差/平均）が0.1以下のものをのみを示している。ただし、粘性ダンパーの K'_d は値が小さいため（3.2節）、変動係数が0.2以下までとした。

図9より、 $\delta = 0.64$ での粘性ダンパーの風直角方向応答時の K'_{dLS} は、 $V_r = 8$ 以降でようやく自由振動時の K'_d と一致する。さらに、 $\delta = 4.79$ のケースでの K'_{dLS} は、 $V_r = 10$ 付近まで K'_d に比べ低い値となる。図7に示した $\delta = 0.64$ での粘性ダンパー変形のPSDからも分かるように、 $V_r = 4$ での応答には固有振動数より低振動数側の成分を有するため、 K'_{dLS} は共振振動数での K'_d より低い値となる。

粘性ダンパーの粘性係数 C'_{dLS} は、図3(b)からも分かるように、本試験で用いた粘性ダンパーの C'_d に振動数依存性が殆どないため、常に自由振動時の C'_d とほぼ一致していることが確認できる。

粘弾性ダンパーの $\delta = 4.79$ での K'_{dLS} は、 $V_r = 7$ 付近より低い範囲では、 K'_d より低い値となり、 $V_r = 7$ 以降でようやく K'_d と一致することが確認できる（図9）。このことは、 V_r の低い範囲で風直角方向

応答時の粘弾性ダンパーの剛性が低めの値となるため、システム剛性への寄与が小さくなることを意味する。そのため、図4の粘性システムと粘弾性システムの応答の比較において、減衰が大きいシステムの場合に、 $V_r = 7$ より低い範囲では粘性システムと粘弾性システムの応答の違いは見られないが、 $V_r = 7$ 以降から粘弾性ダンパーの剛性が増大したことで、粘弾性システムの剛性が増加し、粘弾性システムが粘性システムより小さい応答となった。

$\delta = 4.79$ での、粘弾性ダンパーの C'_{dLS} の変化を見ると、 $V_r = 8$ 以下の風速で C'_{dLS} が C'_d に比べ大きくなっていることが確認できる（図9）。これは、図3(b)からも分かるように、低振動数での粘弾性ダンパーの C'_d が増加する特性を有するためである。

次に、風方向応答について検討する。ここでは、風直角方向と同様、粘性および粘弾性システムの $\delta = 0.64$ と $\delta = 4.79$ について言及する。

図10（次頁）に、粘性および粘弾性システムの風方向応答 $\delta = 0.64$, 4.79 における、コイルバネ位置でのダンパー変形の変動成分のPSD（単位： mm^2/s ）を、図11（次頁）に、ダンパー変形が最大値を示す周辺 $10/f_0$ 秒間でのダンパー変形一力の履歴を示す。それぞれの図において $V_r = 4, 8, 12$ の結果を示している。なお、PSDおよびダンパー履歴は平均成分を除いた変動成分のみを示している。

風方向の風力は低振動数側にパワーを持った広帯域な外力であるため、図10の風方向応答のPSDも、固有振動数より低振動数側に大きなパワーが存在することが分かる。 V_r が大きい場合でも、風直角方向応答時（図7）とは異なり固有振動数成分より低振動数側の成分が依然として多い応答となる。

粘弾性システムの $\delta = 4.79$ でのPSDのピークは、粘弾性ダンパーの剛性の寄与（3.2節）によって、 $f/f_0 = 1$ より高振動数側に推移していることが確認できる（図10）。

風方向応答時の粘性および粘弾性ダンパーの履歴から式(5)を用いて算出した K'_{dLS} および C'_{dLS} を、自由振動試験時の K'_d , C'_d でそれぞれを基準化（Wind/Free）したものを図12（次頁）に示す。

図12より、風方向応答は風直角方向応答より多くの低振動数成分を含んでいるため（図10）、粘性ダンパーの風方向応答時の K'_{dLS} は、風直角方向応答時（図9）のように、 V_r が増加しても K'_{dLS} が自由振動と一致することはない。減衰の大きい $\delta = 4.79$ では、さらにそれが顕著となる。

粘性ダンパーの C'_d は振動数依存性を殆ど有しないので（図3(b)）、当然、風方向応答時においても C'_{dLS} は常に C'_d と一致する（図12）。

風方向応答 $\delta = 0.64$ の粘弾性ダンパーの K'_{dLS} は、風直角方向応答時（図9）に比べて若干小さい値となるが、粘性ダンパーほどの大きな違いは確認できない。これは、粘弾性ダンパーの K'_d の振動数依存性が粘性ダンパーほど強くないためである（図3）。

一方、粘弾性ダンパーの $\delta = 4.79$ では、システムの減衰が大きいため、共振振動数成分以外、特に低振動数成分が多く含まれた応答となり（図10）、 $V_r = 12$ でも K'_{dLS} は自由振動時の値より小さい値となる。風方向では、粘弾性ダンパーの量を多くしてもダンパー剛性がシステム剛性へ効率的に寄与しないことに注意が必要である。

風方向応答 $\delta = 4.79$ での粘弾性ダンパーの C'_{dLS} は、低振動数成分の影響により常に自由振動時に比べ大きい値となることが分かる。

振動数依存性を有するダンパーを風制振に用いる場合には、風速によっては自由振動実験時のダンパー特性と異なり、システム特性

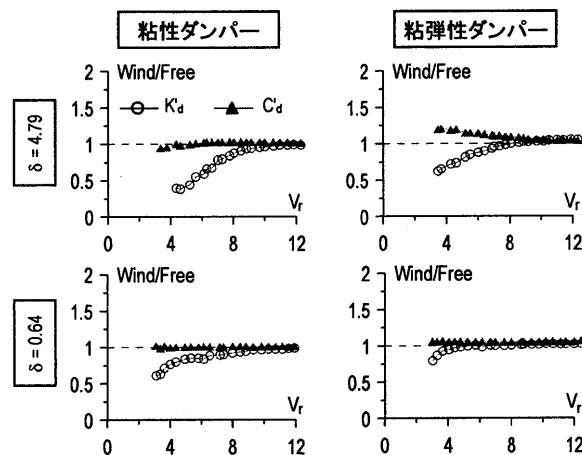


図9 風直角方向応答時の K'_d と C'_d の変化

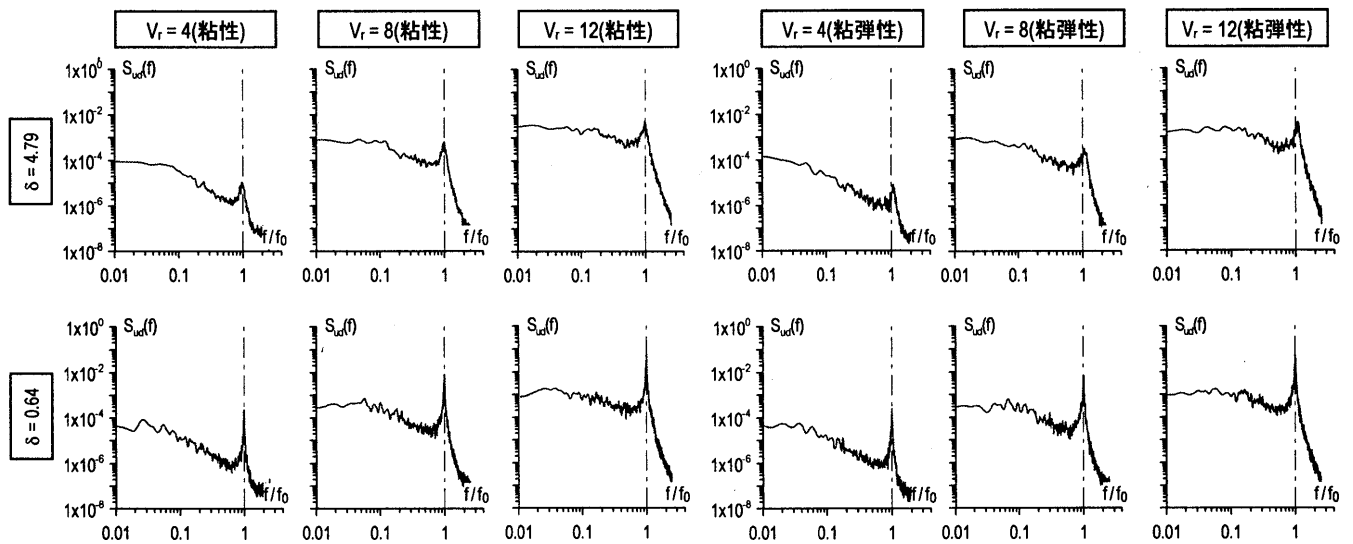


図 10 風方向応答時の粘性および粘弾性ダンパー変形のパワースペクトル密度(変動成分)

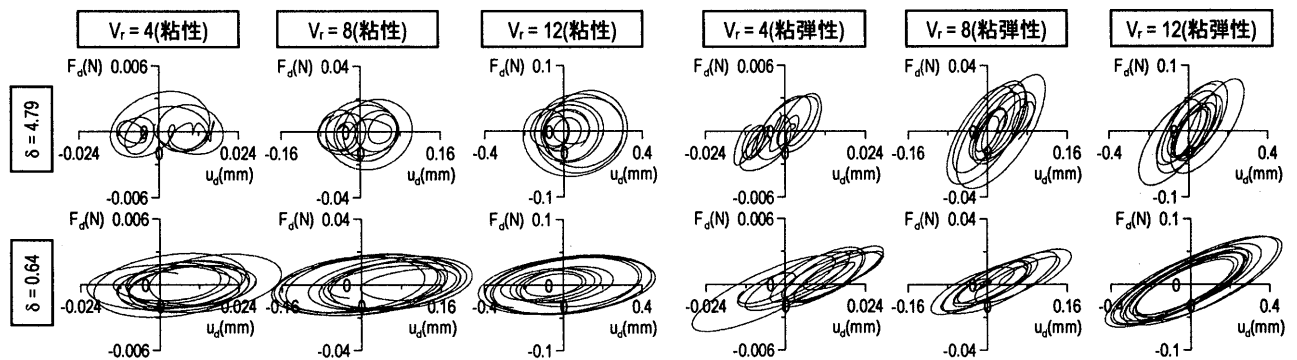


図 11 風方向応答時の粘性および粘弾性システムのダンパー履歴(変動成分)

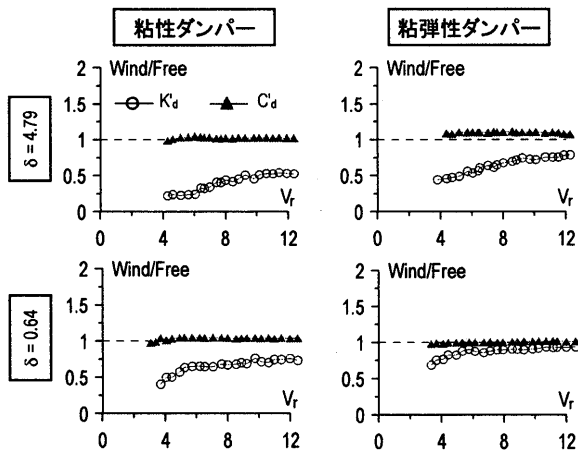


図 12 風方向応答時の K_d と C_d の変化

も風速によって変化することに注意する必要がある。同様のことは、地震応答の場合において笠井ら^{11),12)}によって報告されている。

4.3 ピークファクターの比較

図 13 に、 $\delta = 0.64, 4.79$ での粘性および粘弾性ダンパー変形より求めたピークファクター g (= 最大値 / 標準偏差) を、風直角方向と風方向で重ねて示す。境界層乱流中でのピークファクターは、一様流下中での渦励振時⁵⁾ のように正弦波振動を意味する $\sqrt{2}$ とならず、3~4 の値となる。 $\delta = 0.64$ では、 V_r の増加とともに風直角方向のピークファクターが減少していくのに対し、風方向では一定値となる。一方、 $\delta = 4.79$ では、風直角方向であっても V_r が増加してもピーク

ファクターは減少せず一定値のままである。これは、上述したように、風直角方向で減衰が小さい場合は、 V_r が大きい範囲で応答が比較的狭帯域となるのに対し、減衰が大きいシステムまたは風方向では、低振動数成分の影響を受けた広帯域の応答となるためである。

風直角方向、風方向共に $\delta = 4.79$ のピークファクターは $\delta = 0.64$ での結果に比べ多少大きな値となる。これは、 $\delta = 4.79$ の場合は $\delta = 0.64$ に比べ減衰が大きいため、共振振動数成分が小さくなり逆に、風力による低振動数成分の強制振動の影響が大きくなるためである。粘性ダンパーと粘弾性ダンパーのピークファクターに大きな違いは確認されなかった。

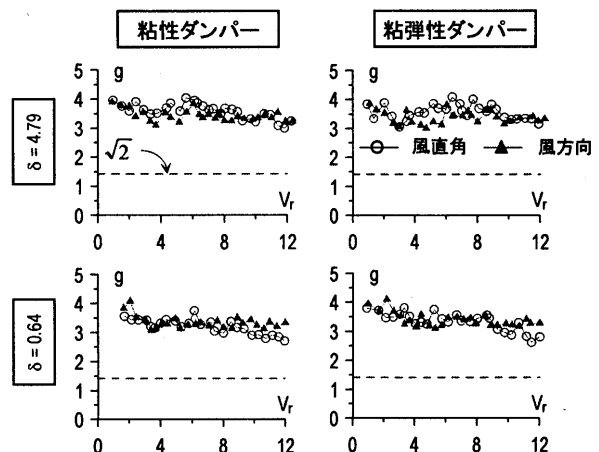


図 13 風直角方向応答時と風方向応答時のピークファクターの比較

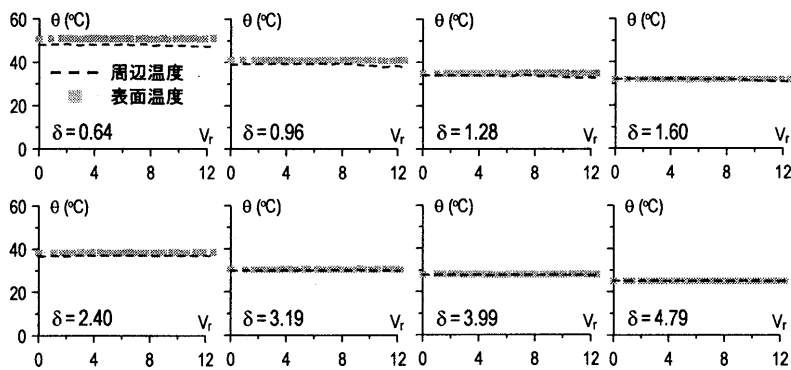


図 14 風直角方向応答時の粘弾性体温度と周辺温度の関係

4. 4 風応答時の粘弾性ダンパーの温度制御

図 14 に、粘弾性システムにおける風直角方向応答時における粘弾性体の表面温度とダンパー周辺温度を各 δ について示す。

粘弾性体は振動エネルギーを熱エネルギーに変換するため、振動時には発熱する。本試験では、粘弾性体の温度上昇によりダンパー特性が変化することを避けるため、各 δ で粘弾性体の表面温度を V_r によらず一定となるように、ダンパー周辺温度を変化させている(2.1 節)。境界層乱流中での応答は、一様流中での渦励振応答のように大変形とならないため、粘弾性体の発熱量も小さく、熱伝導・伝達の効果⁴⁾⁵⁾により粘弾性体内部に熱がこもらず、粘弾性体温度の制御を簡単に行うことができた。風方向応答時においても同様である。

5. おわりに

本論文では、風応答時においてもダンパー履歴を計測できる風洞実験装置を用いて、粘性および粘弾性ダンパーの振動数依存性が制振構造の風応答に与える影響を明らかにすることを目的として、境界層乱流中での風洞実験を行った。以下に、結論を述べる。

- (1) 固有振動数を変えた自由振動試験により、粘性・粘弾性ダンパーの振動数依存性の違いを示した。粘性ダンパーも若干の剛性を有し、両ダンパーともに貯蔵剛性は低振動数側で小さくなる。また、粘性ダンパーの粘性係数は振動数依存性がなく一定値であるが、粘弾性ダンパーの粘性係数は低振動数側で大きくなる。
- (2) 風直角方向の応答において、渦発生時の周波数がシステムの固有振動数より低振動数側にあるような低風速域では、低振動数成分の影響により粘弾性ダンパーの剛性が低い値となる。渦発生時の振動数が固有振動数と一致する高風速域では、システムの固有振動数成分のみが卓越するため、粘弾性ダンパーの剛性が増加し、システムの剛性に寄与することで、粘性ダンパーを用いた場合より応答が低減することを確認した。
- (3) 粘弾性ダンパーは、粘性ダンパーと異なり静的剛性を有するが、その値は小さく、粘弾性ダンパーによる風方向での平均変位の低減効果は殆ど確認されなかった。
- (4) 風方向の風力が低振動数側に大きなパワーを有するため、風方向応答では、高風速領域においても低振動数成分の影響を受け、ダンパー特性は、共振振動数で振動する自由振動試験と異なる値となる。
- (5) 境界層乱流中での応答は、一様流中での渦励振のように大変形とならず、粘弾性ダンパーがエネルギーを吸収する際の発熱量

は小さい。そのため、本試験では、粘弾性体の温度を容易に制御することができた。

粘弾性ダンパーの振動エネルギー吸収による温度上昇は、変形や振動数はもちろんのこと、ダンパーの形状や周辺温度などの影響を受けるため⁵⁾、場合によっては風応答時に粘弾性体の温度が上昇し、ダンパーの減衰性能、ひいてはシステムの減衰性能を低下させ、応答が増大する危険性も考えられる。これについては、本試験装置および温度制御手法を用いて、振動時に周辺温度を一定にする、もしくは上昇させ、粘弾性体の温度を上昇させることで、実験的に再現できるものと思われ、今後行う予定である。

参考文献

- 1) 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第1回～第4回, 2000.3, 2001.12, 2002.12, 2004.11
- 2) (社)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1版, 2003.10, 第2版, 2005.9
- 3) 笠井和彦: 粘弾性材料-建物制振への適用, 未来材料, 2(3), pp.42-47, 2002.3
- 4) 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
- 5) 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-粘性・粘弾性ダンパーを有する高層建築物の一様流における風洞実験-, 日本建築学会構造系論文集, 第609号, pp.65-73, 2006.11
- 6) 笠井和彦, 寺本道彦, 大熊深, 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
- 7) Cho, K.-P., Cermak, J.E., Lai, M.-L. and Nielsen, E.: Viscoelastic damping for Wind-Excited Motion of a Five-Story Building Frame, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 77&78, pp.269-281, 1998
- 8) 日本建築センター: 実務者のための建築物風洞実験ガイドブック, 1994
- 9) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 丸善, 2004.9
- 10) 孟岩, 日比一喜: 高層建築物周辺の流れ場の乱流計測, 日本風工学会誌, 第76号, pp.55-64, 1998.7
- 11) 笠井和彦, 大熊深: Kelvin 体による線形粘弾性ダンパー簡易モデル化と精度に関する考察(その1弾性・弾塑性フレームをもつ一質点制振構造の場合), 日本建築学会構造系論文集, 第550号, pp.71-78, 2001.12
- 12) 笠井和彦, 大熊深: 振動数に依存する制振構造の等価周期・等価減衰の評価法とその精度-弾性架構と粘弾性ダンパーやオイルダンパーをもつ一質点構造における全体減衰係への置換法-, 日本建築学会構造系論文集, 第580号, pp.51-59, 2004.6
- 13) 岡田玲, 田村哲郎, 和田章: 境界層乱流中における弾塑性ダンパーを有する高層建物の風方向挙動に関する風洞実験, 日本建築学会構造系論文集, 第554号, pp.29-36, 2002.4
- 14) 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

付録 A Maxwell モデルのパラメータの同定

Maxwell モデルのパネ要素を K_m , ダッシュポット要素を C_m とすると、 K'_d および C'_d はそれぞれ次式で表される¹²⁾。

$$K'_d = \frac{K_m(C_m\omega)^2}{K_m^2 + (C_m\omega)^2}, \quad C'_d = \frac{K_m^2 C_m}{K_m^2 + (C_m\omega)^2} \tag{A1a,b}$$

式(A1)の $K'_d(\omega, K_m, C_m)$, $C'_d(\omega, K_m, C_m)$ と、実験値 $K'_{d,i}$, $C'_{d,i}$ ($i=1 \sim n$: n = 実験値総数)の相対誤差の2乗和 $R_{K',C'}(K_m, C_m)$ が、最小となるように、2パラメータ K_m, C_m を Excel のソルバーを用いて求める。

$$R_{K',C'}(K_m, C_m) = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\frac{K'_{d,i}(\omega_i, K_m, C_m)}{K'_{d,i}} - 1 \right]^2 + \left[\frac{C'_{d,i}(\omega_i, K_m, C_m)}{C'_{d,i}} - 1 \right]^2 \right\} \tag{A2}$$

3.3 節で示した例の場合 ($n=3$), $K_m=0.83(\text{N/mm})$, $C_m=1.20 \times 10^{-3}(\text{N}\cdot\text{s/mm})$ となった。 $\beta=K_m/C_m$ とすると¹²⁾, $\beta=7.0 \times 10^2 (1/\text{s})$ となり、本試験で用いた粘性ダンパーの K_m は十分に大きな値であることが分かる。そのため、粘性ダンパーの C'_d の振動数依存性が殆ど現れなかった¹²⁾ (図3)。