

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	粘弾性ダンパーを有する角柱状高層建物模型の風直角方向応答予測
Title(English)	PREDICTION OF WIND RESPONSE OF HIGH-RISE BUILDING MODEL HAVING VISCO-ELASTIC DAMPER
著者(和文)	佐藤大樹, 田村哲郎, 笠井和彦
Authors(English)	Daiki Sato, TETSURO TAMURA, KAZUHIKO KASAI
出典(和文)	第20回風工学シンポジウム論文集, Vol. 20, , pp. 247-252
Citation(English)	PROCEEDINGS OF THE 20th NATIONAL SYMPOSIUM ON WIND ENGINEERING, Vol. 20, , pp. 247-252
発行日 / Pub. date	2008, 12

粘弾性ダンパーを有する角柱状高層建物模型の風直角方向応答予測

PREDICTION OF WIND RESPONSE OF HIGH-RISE BUILDING MODEL HAVING VISCO-ELASTIC DAMPER

佐藤 大樹¹⁾ 田村 哲郎²⁾ 笠井 和彦³⁾Daiki SATO¹⁾, Tetsuro Tamura²⁾ and Kazuhiko KASAI³⁾

ABSTRACT

It has been recognized that viscoelastic (VE) damper have significant advantage of being effective against not only the wind but also earthquake-induced response. However the effect of the VE damper on the wind-induced response has not been fully comprehended. In order to clarify the characteristics of the wind-induced response of tall building having VE dampers, the wind tunnel test model, which is installed VE damper and special measurement system to obtain the damper hysteresis loop, is developed, and the wind tunnel tests under the turbulent boundary layer flow are carried out.

In this paper, the wind-induced response prediction method of the tall building having viscoelastic damper is proposed. The frequency sensitivity of VE damper is considered by using the fractional derivative model. Accuracy of the proposed prediction method is demonstrated by comparing with the results of wind tunnel test of tall building model with VE damper, and the applicability of this method are presented.

Key Words: Viscoelastic Damper, Fractional Derivative, Wind Tunnel Test, Prediction

1. はじめに

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振動変形から、大地震のような非常に大きな変形まで安定した性能を示すことが知られており、台風と地震の発生頻度の高い日本では高層建築物の制振に用いる利点は多い。しかし、粘弾性ダンパーは振動数や温度に依存する複雑な特性を有するため、粘弾性ダンパーを設置した制振構造の風応答に関する研究はあまり行われてこなかった。それに対して、筆者らは文献 1, 2 において、粘弾性ダンパーを有する高層建物の風応答を把握することを目的として、ダンパーの履歴特性を考慮し、かつ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。本風洞実験装置に特性の異なる粘性および粘弾性ダンパーを設置し、一様流および境界層乱流での空力振動実験を行い、ダンパー特性の違いが風応答に与える影響について明らかにした^{1),2)}。これらの文献に示した知見により、粘弾性ダンパーを有する制振構造の風応答を精度良く予測するためには、粘弾性ダンパーの温度・振動数依存性を考慮する必要があることが分かった。

本論文では、粘弾性ダンパーの履歴特性を精度良く再現できる分数微分構成則^{1),3)}を用いた予測手法を提案し、文献 2 で行った境界層乱流中での風直角方向の空力振動実験と比較することで、本手法の精度および適用範囲を明らかにすることを目的とする。以下に、本論文の構成を述べる。2 章では開発した風洞実験装置および風洞実験の概要について述べる。3 章では粘弾性ダンパーの温度・振動数依存性を考慮した応答予測法について述べ、予測法に用いられる分数微分構成則の精度について検証した後、本予測手法の精度および適用範囲について述べる。

1) 東京理科大学理工学部建築学科 助教 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)
 2) 東京工業大学環境理工学創造専攻 教授 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)
 3) 東京工業大学建築物理センター 教授 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)

2. 実験装置および風洞実験概要^{1,2)}

2.1 風洞実験装置および計測概要

図1に、建物模型のロッキング振動に伴い駆動する粘弾性ダンパーを設置した風洞実験装置¹⁾を示す。以降、粘弾性システムと呼ぶ。本実験装置は、粘弾性ダンパーの温度・振動数依存性を空力振動実験においても考慮できるように開発されたものであり、応答時のダンパー履歴を計測することができる。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²⁾。

粘弾性ダンパーは、厚さ3 mmのアルミ板(上板、下板)の間に幅、奥行き、高さ(B_d, D_d, H_d)=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、実験時との相似則を満たすような等価なダンパー特性を得るために、「温度・振動数等価性」³⁾を利用し、実験時には粘弾性体を加熱した。粘弾性体温度が高くなると、コイルバネに対する相対的な粘弾性ダンパーの剛性が低くなるため、システムに対するダンパーの寄与についてはシステムの減衰定数 ξ_{eq} が小さくなる。

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、振動時には発熱し温度が上昇する。空力振動実験では、粘弾性体の温度上昇によりダンパー特性やシステムの減衰定数が変化することを避けるために、いかなる風速においても粘弾性体の温度が特定の温度で一定となるように制御している(温度制御手法¹⁾)。粘弾性体温度の制御は、実験装置内におかれた2個の電球(図1(c))によりダンパー周辺温度を調整して行っている。

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(a))での計測値から、幾何学的関係を用いて算出した¹⁾。また、粘弾性ダンパーのダンパー力は、ダンパーに固定した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(図1(c))で、ダンパー周辺温度は熱電対で計測を行った¹⁾。

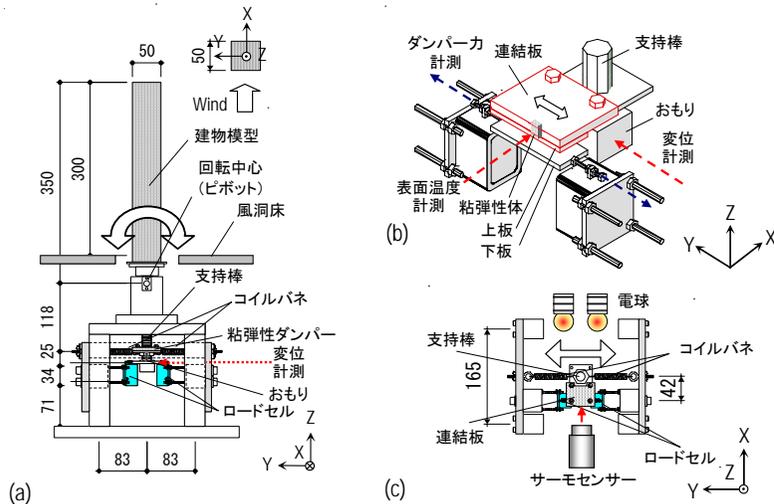


図1 風洞実験装置(単位:mm):(a)立面図,(b)ダンパー詳細,(c)温度制御・計測状況

2.2 風速計測および境界層乱流の気流性状

粘弾性ダンパーは振動数依存性を有するため風応答時にはダンパー特性が時々刻々と変化する。そのため、無次元風速 V_r を定義する際に用いる、システムの等価振動数を決定することは困難である。また、文献1, 2では粘弾性ダンパーを有するダンパーがシステムや応答に与える影響に着目しているため、無次元風速 V_r にはダンパー設置していない状態での固有振動数 f_0 を用いている^{1,2)}。本論文は文献2の実験結果を再現することを目的としていることから、本論文においても文献1, 2と同じ定義で V_r を用いることとする(式(1))。

$$V_r = U / (f_0 B) \quad (1)$$

ここで、 U = 平均風速、 f_0 = ダンパー非設置時の固有振動数であり、硬バネタイプ、柔バネタイプでそれぞれ、 $f_0 = 17.8$ Hz、 8.9 Hzである²⁾。なお、自由振動試験より求めた粘弾性ダンパーを設置することによる固有振動数の変化は、最大でも柔バネタイプで8%である²⁾。

風洞実験の気流性状の例として、図 2(a)~(c)に、模型位置での気流から計測された平均風速プロファイル、乱れ強さおよび模型頂部高さでのパワースペクトル密度(以下、PSD)を示す。図 2 には、ベキ指数 $\alpha=0.27$ のべき乗則⁵⁾、孟らの結果⁶⁾およびカルマン型のPSD⁵⁾を合わせて示しており、本試験結果はそれらと良い対応を示していることがわかる。また、気流性状に風速および空間的な依存性がないことを確認している。境界層乱流性状の詳細や作成方法については文献 2 を参照されたい。

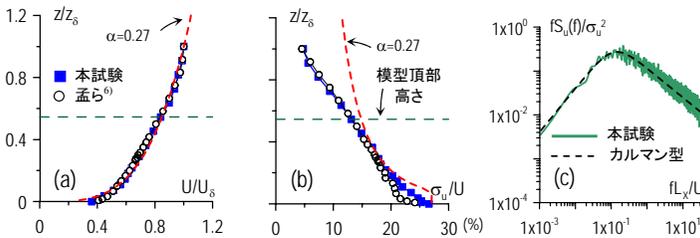


図 2 気流性状:(a)平均風速、(b)乱れの強さ、(c)パワースペクトル密度

2.3 風力実験

応答予測に用いる風力のPSDを得るために、静止した建物模型に作用する風力の計測を行った。図 3 には風力実験より得られた転倒モーメント M_L のPSD $S_{M_L}(f)$ を無次元化して示す。図中には荷重指針⁵⁾による値も破線で併記している。また、実験より得られた転倒モーメント係数 $C'_L=0.183$ (式(3b)参照)と、荷重指針⁵⁾の式(実線、破線)および C'_L (プロット)との比較を図 4 に示す。図 3, 4 より、本風力実験結果は荷重指針と良い対応を示していることがわかる。

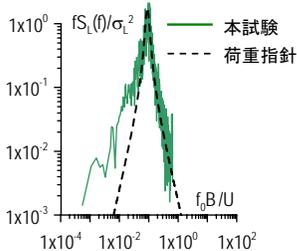


図 3 M_L のPSD

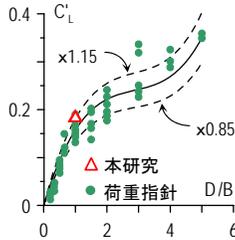


図 4 転倒モーメント係数 C'_L の比較

2.4 風直角方向の空力振動実験概要

図 1 に示した風洞実験装置を用いて、境界層乱流中での空力振動実験を行った²⁾。空力振動実験では、質量減衰パラメータ δ ¹⁾を次式の如く設定して、 V_f を変化させて行った。

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

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、(図 1 参照))、 L_s = ピボットからコイルバネまでの距離 (=118mm、(図 1 参照))である。本試験では、 $\delta=0.64\sim 1.60$ ($\xi_{eq}=0.8\sim 2.0\%$ 、硬パネタイプ) および $\delta=2.40\sim 4.79$ ($\xi_{eq}=3.0\sim 6.0\%$ 、柔パネタイプ)の範囲で実験を行った。実験概要および結果の詳細については文献 2 を参照されたい。風洞実験の開始前に行ったダンパーを設置した状態での自由振動試験より得られた減衰定数 ξ_{eqf} と δ 、および粘弾性体表面温度の関係を表 1 に示す。

表 1 ξ_{eqf} と δ および表面温度の対応関係

	硬パネシステム				柔パネシステム			
δ	0.64	0.96	1.28	1.60	2.40	3.19	3.99	4.79
$\xi_{eq,f}$ (%)	0.80	1.20	1.60	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
温度 (°C)	53.0	41.0	35.0	32.0	38.5	30.5	28.0	25.0

3. 粘弾性システムの風洞実験シミュレーション

3.1 応答予測法

本応答予測法について述べる。はじめに、風力実験(2.3節)または荷重指針⁵⁾から、図3,4に示すような、無次元化された建物基部での転倒モーメントのPSD $S_L(f)$ および転倒モーメント係数 C'_L が与えられているとする。本研究では、風力実験より $C'_L = 0.183$ を得ており、その値を用いる。また、転倒モーメントのPSD $S_L(f)$ も実験値を用いる。模型頂部での平均風速 U を設定し、空気密度 $\rho (=1.22\text{kg/m}^3)$ を用いて、式(3a)の速度圧 q_H を算出し、転倒モーメントの標準偏差 σ_L を式(3b)より求める⁵⁾。

$$q_H = \frac{1}{2} \rho U^2, \quad \sigma_L = C'_L q_H B H^2 \quad (3a, b)$$

その後、 σ_L 、 B および U を用いて図3の縦軸・横軸を有次元化し $S_L(f)$ を得る。模型基部での転倒モーメント $M_L(t)$ と、模型頂部高さ H での等価な水平力 $F_H(t)$ は式(4a)で表される。同様に、水平力 $F_H(t)$ のPSD $S_{FH}(f)$ は、模型基部での転倒モーメントのPSD $S_L(f)$ を用いて式(4b)より得られる。

$$F_H(t) = M_L(t)/H, \quad S_{FH}(f) = S_L(f)/H^2 \quad (4a, b)$$

この時、コイルバネ位置での等価な力 $F_s(t)$ およびそのPSD $S_{Fs}(f)$ はそれぞれ次式で表される。

$$F_s(t) = F_H(t) \cdot L_H / L_s, \quad S_{Fs}(f) = S_{FH}(f) \cdot (L_H / L_s)^2 \quad (5a, b)$$

よって、式(4b)を式(5b)に代入することで、コイルバネ位置での外力のPSD $S_{Fs}(f)$ は次式の如く表される。

$$S_{Fs}(f) = S_L(f) \cdot \{L_H / (L_s \cdot H)\}^2 \quad (6)$$

式(6)より得られたコイルバネ位置での外力のPSD $S_{Fs}(f)$ に、ダンパーの振動数依存性を考慮した変位のアドミッタンス $|H_D(f)|^2$ (式(7a))を乗ずることで、変動応答変位のPSD $S_D(f)$ (式(7b))を得る。

$$|H_D(f)|^2 = \frac{1}{\left\{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + \frac{K'_d(f)}{K_s}\right\}^2 + \left(2\xi_0 \frac{f}{f_0} + \frac{K''_d(f)}{K_s}\right)^2} \cdot \frac{1}{K_s^2}, \quad S_D(f) = |H_D(f)|^2 \cdot S_{Fs}(f) \quad (7a, b)$$

ここで、 K_s = コイルバネ(2本)の剛性である。また、 $K'_d(f)$ = コイルバネ位置での粘弾性ダンパーの貯蔵剛性、 $K''_d(f)$ = コイルバネ位置での粘弾性ダンパーの損失剛性であり、これらは振動数や温度に依存する¹⁾³⁾。応答予測を行う際には、式(7a)に用いられる $K'_d(f)$ および $K''_d(f)$ の精度が重要となる。本研究では、 $K'_d(f)$ および $K''_d(f)$ には分数微分構成則³⁾(以下、FDモデル)を用いる。FDモデルでの $K'_d(\omega)$ および $K''_d(\omega)$ ($\omega = 2\pi f$)は、次式でそれぞれ表される¹⁾。

$$K'_d(\omega) = \frac{G}{\beta'} \frac{1 + ab\omega^{2\alpha} + (a+b)\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)}{1 + a^2\omega^{2\alpha} + 2a\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)}, \quad K''_d(\omega) = \frac{G}{\beta'} \frac{(-a+b)\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)}{1 + a^2\omega^{2\alpha} + 2a\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (8a, b)$$

ここで、 α は分数微分の次数である。 a 、 b は温度 θ に依存し次式から求められる³⁾。

$$a = a_{ref} \lambda^\alpha, \quad b = b_{ref} \lambda^\alpha \quad (9a, b)$$

$$\lambda = \exp\left[-p_1(\theta - \theta_{ref}) / (p_2 + \theta - \theta_{ref})\right] \quad (10)$$

λ は温度変化を考慮するシフトファクターと呼ばれる³⁾。 θ_{ref} は基準温度、 a_{ref} 、 b_{ref} は基準温度での a 、 b 値である。本風洞実験用粘弾性ダンパーのFDモデルのパラメータは、文献1より $a_{ref} = 0.0037$ 、 $b_{ref} = 0.0358$ 、 $\alpha = 0.8831$ 、 $G = 1.043 \times 10^5$ (N/m²)、 $p_1 = 69.509$ 、 $p_2 = 1105.817$ 、 $\theta_{ref} = 40^\circ\text{C}$ である。これらは、粘弾性ダンパーを設置し、様々な温度や振動数での自由振動試験結果より得られた値である¹⁾。また、式(8)の β' は風洞実験に用いた粘弾性ダンパーの曲げ・せん断および上下板による歪み拘束の効果を考慮するための係数であり次式で表される¹⁾。

$$\beta' = \frac{H_d}{A_s} \left[1 + \frac{(H_d - 2H_0)^3}{24(1-\nu)I} \frac{A_s}{H_d} \right] \quad (11)$$

ここで、 $A_s=5A/6$ ($A=B_d \times D_d$)、 ν =ポアソン比 (= 0.47¹⁾)、 I =粘弾性体の断面二次モーメント、 H_0 =粘弾性体の断面が歪み拘束される上下板からの距離であり、3次元有限要素解析による静的解析と式(8a)の貯蔵剛性が一致するように決定し、 $H_0=0.43$ mmとした¹⁾。パラメータの同定手法については文献1を参照されたい。

応答変位の分散 σ_D^2 は、式(7a)より得られる $S_D(f)$ を振動数軸上で積分することで得られる(式(12a))。また、応答回転角の標準偏差 ϕ_{rms} は、ピボットからコイルバネまでの距離 L_s を用いて式(12b)より算出される。

$$\sigma_D^2 = \int_0^\infty S_D(f) df, \quad \phi_{rms} = \sigma_D / L_s \quad (12a, b)$$

3.2 ダンパー履歴の実験と解析の比較

前節で述べたように、本予測法において、FDモデルの精度が重要となる。図5に、文献2で行った境界層乱流中での風直角方向の空力振動実験より得られた、硬バネタイプ ($\delta=0.64\sim 1.60$)での $V_r=4, 8, 12$ における、最大変位付近を中心としたダンパー変位 u_d - ダンパー力 F_d 履歴を示す(実線)。また、実験より得られたダンパー変位を入力とした場合のFDモデルでの時刻歴解析³⁾の結果(破線)も重ねて示す。図5より、FDモデルによる解析結果は、 δ の大きいケースにおいて、解析の剛性が実験値より低くなる傾向が若干見られるが、FDモデルは良い精度で実験のダンパー履歴を再現できていることが確認できた。

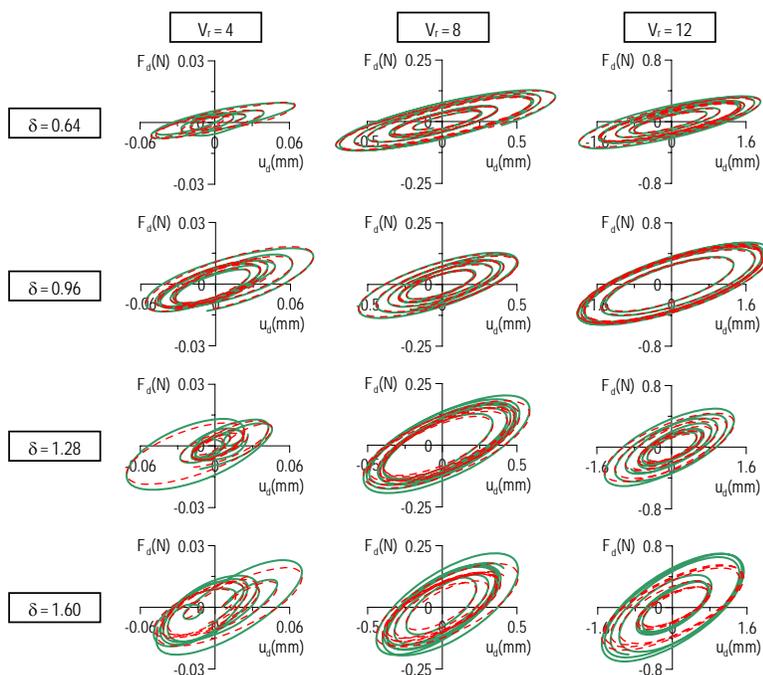


図5 ダンパー履歴の比較(硬バネタイプ) ——— 実験 - - - 解析

3.3 風洞実験シミュレーション

3.1節で述べた応答予測法を用いて、粘弾性システムにおける風直角方向の風洞実験²⁾のシミュレーションを行い、本予測法の精度を検証する。また、本予測法は、静止している模型に作用する風力を元に応答を予測するため、建物が振動することによって発生する振動依存風力の影響を考慮できない。本予測法と空力振動実験の結果を比較することで、本手法の適用範囲についての検討も行う。図6に、粘弾性システムにおける風直角方向の応答曲線の実験値およびシミュレーション結果を重ねて示す。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 $\phi_{rms} (= \sigma_y / L_M; \sigma_y =$ 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6より、 δ の小さいケースにおいて、 $V_r=8$ 付近までの予測値は実験を精度良く再現しているが、 $V_r=9$ 以上となると、予測値は実験値を大きく下回る。前述したように、本予測に用いた転倒モーメントのPSD(図3)が、静止模型に作用する風力から求めたものであるため(2.3節)、模型が振動することにより発生する、振動依存風力による相互作用は考慮されていない。そのため、振動依存風力の影響が大きくなる、低減衰・大振幅の領域で、予測は実験値より低い値となる。一方、 δ の比較的大きいシステムにおいては、振動依存風力の影響が小さくなるため、 V_r が大きい範囲においても、予測値は実験と精度良く

一致することが確認できる。

次に、本手法の適用範囲について述べる。図6中の破線は、式(13)に示す粗度区分IV、 $B/D = 1$ の場合の、風直角方向の空力不安定振動の検討用無次元風速 $V_{r,Lcr}$ である⁵⁾。

$$V_{r,Lcr} = 0.83(0.7\delta + 8.8) \quad (13)$$

図6より、式(13)で表される発振風速以下では、いずれの δ においても本予測法は十分な精度で実験を再現できていることがわかる。以上より、本予測手法の適用範囲を式(13)により評価できることを確認した。

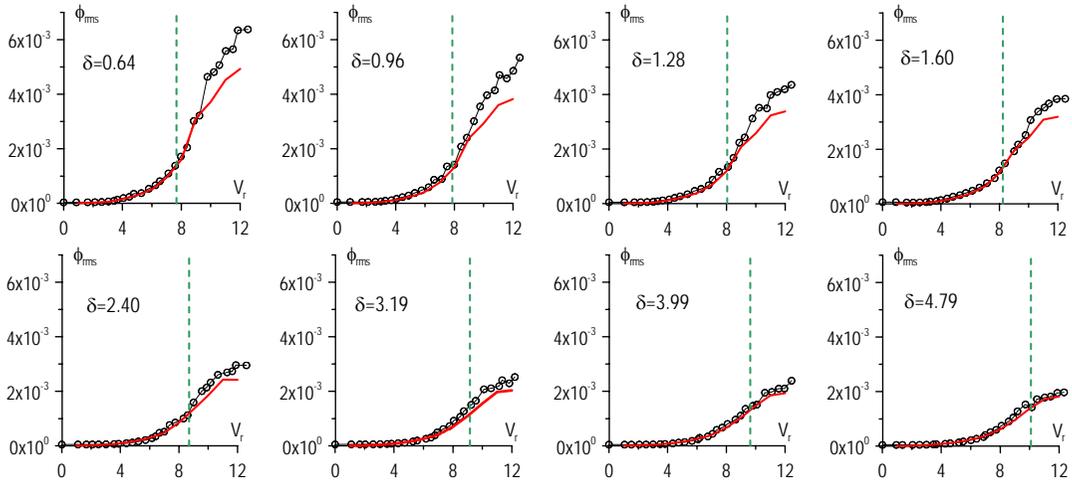


図6 実験結果とシミュレーション結果の比較 —○— 本試験 — — 予測 — — 式(13)

4. まとめ

本論文では、粘弾性ダンパーの履歴特性を精度良く再現できる分数微分構成則を用いた応答予測法を提案し、文献2で行った粘弾性ダンパーを有する風洞実験装置による境界層乱流中における風直角方向の空力振動実験のシミュレーションを行い、本予測法の精度およびその適用範囲について検討を行った。以下に本論文より得た知見を述べる。

- (1) 分数微分構成則は、精度良く風洞実験時のダンパー履歴を再現できていることを確認した。
- (2) 本応答予測法は、静止模型に作用する風力より得られたパワースペクトル密度を応答予測に用いているため、建物が振動することにより発生する振動依存風力の影響を考慮していない。そのため、振動依存風力の影響が大きくなる低減衰のシステムで、かつ、風速が高い範囲では、実験値に比べ予測値は小さい値となった。
- (3) 減衰の低いシステムにおいても、風速の低い範囲では、振動依存風力の影響が小さいため予測値と実験は精度良く一致することを確認した。また、減衰が比較的大きいシステムでは、高風速時においても振動依存風力の影響が小さくなるため、広い風速の範囲で実験を高精度に再現できることを確認し、本手法の有用性を示すことができた。
- (4) 本予測手法の適用範囲は風直角方向の空力不安定振動の発振無次元風速により十分に評価できることを確認した。

以上より、建物に減衰を付加することで、高精度に風応答予測できる適用範囲が広がることが確認された。これは、性能設計を行う上で、建物を制振化(高減衰化)することは大きな利点である。

参考文献

- 1) 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樣流中における風洞実験—, 日本建築学会構造系論文集, 第609号, pp.65-73, 2006.11
- 2) 佐藤大樹, 田村哲郎, 笠井和彦: 粘性・粘弾性ダンパーを有する高層建物の風応答性状に関する風洞実験, 日本建築学会構造系論文集, 第617号, pp.95-102, 2007.7
- 3) 笠井和彦, 寺本道彦, 大熊潔, 所健: 粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則(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
- 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) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 丸善, 1997.4
- 6) 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