

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	振動数依存性を有する粘弾性ダンパーを設置して制振建物の風応答時におけるエネルギー入力予測手法の提案
Title(English)	Prediction Method of Wind-Induced Response Input-Energy for VE Damped System with Frequency-Sensitivity
著者(和文)	張庭維, 佐藤大樹
Authors(English)	Ting-Wei CHANG, Daiki Sato
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , , pp. 693-694
Citation(English)	, , , pp. 693-694
発行日 / Pub. date	2021, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

振動数依存性を有する粘弾性ダンパーを設置して制振建物の風応答時におけるエネルギー入力の予測手法の提案

正会員 〇張庭維*
同 佐藤大樹**

粘弾性ダンパー 振動数依存性 分数微分モデル
風洞実験 風応答 エネルギー入力

1. はじめに

日本の高層建築物の多くは、ダンパーを設置した制振構造が採用されている。その中で、粘弾性ダンパーは、日常吹く風による微小振動変形から、地震や強風などによって生じる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いる^[1]。さらに、佐藤らは、粘弾性ダンパーの振動数依存性の特性を検証した^[2]。また、吉江らは、弾塑性ダンパーを有する高層建築物のエネルギー入力予測手法を提案している^[3]。

しかし、粘弾性ダンパーの振動数依存性を考慮した、風応答のエネルギー入力の予測手法はこれまでに提案されていない。本研究では、振動数依存性を有する粘弾性ダンパーを用いた制振構造の風応答のエネルギー入力について検討するために、分数微分モデル（以下、FDモデル）、Kelvinモデル、Maxwellモデル、4要素モデル、6要素モデル（図(1)）という振動数依存性の異なる5種類の解析モデルを用いて風方向および風直角方向風力に対する応答解析を行った。本報では、振動数依存性を有する粘弾性ダンパーを設置して制振建物の風応答時におけるエネルギー入力の予測手法を提案する。

2. 建築物モデルと風力の概要

本研究で想定した建築物は、高さ $H=200\text{ m}$ 、幅 B 、奥行 D が等しく $B=D=50\text{ m}$ の超高層建築物で、階高 $h=4\text{ m}$ の50階建を想定した。ダンパーを設置していない建築物（非制振システム）を、1次の固有周期が、 $T_1=0.01H=2\text{ 秒}$ とした1Hフレーム、 $T_1=0.02H=4\text{ 秒}$ とした2Hフレーム、 $T_1=0.03H=6\text{ 秒}$ とした3Hフレームの3種類設定する。さらに、3種類のフレームに対し、5種類のダンパーを設定した。フレームに対し硬と柔の2種ダンパー剛性比 $K_d(\omega)/K_f=2$ と 0.4 を考慮する。前者は高減衰のシステム、後者は現実のものと考えられる。さらに、硬と柔の2種のブレース剛性比 $K_b/K_f=\infty$ と 3 を考える（HH, HS, SH, SS というシステムである）。また、 $K_b/K_f=3$ のブレースを持つシステムである、WSシステムについては、共振振動数での減衰が2%になるように $K_d(\omega)/K_f$ を決定した（弱ダンパー）。いずれのフレームにおいても建築密度を 175 kg/m^3 とし、質量を全層で等しく $m=1.75\times 10^6\text{ kg}$ とした。風洞実験^[4]を使用した建物頂部最大平均風速は $U_H=57.9\text{ m/s}$ である。（地表面粗度区分 III、基準風速 $U_0=36\text{ m/s}$ 、再現期間 500 年として換算した）。10 波（Wave1~Wave10 とする）の風外力時刻歴波形を作成し（風方向と風直角方向）、図(2)で Wave 1~10 の風力 PSD をアンサンブル平均した結果を示す。なお、時刻歴応答解析の過渡応答の影響を避けるため、風方向の波形前後に 50s のエンベロープを設け、全ての 700s 間での応答を評価に用いる（図(3)）。

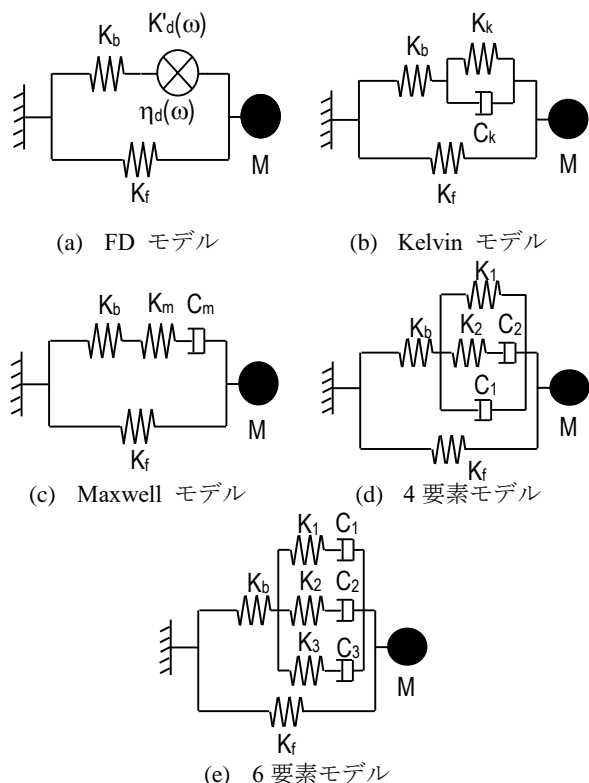


Fig. 1. Viscoelastic Damped Systems

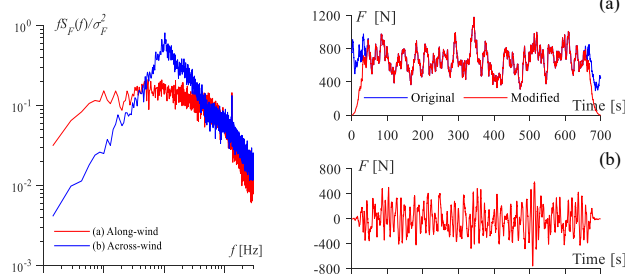


Fig. 2. PSD of Wind Excitation

Fig. 3. Time History of Wind Excitation (a) Along-wind, (b) Across-wind

3. 振動数依存性を考慮した周波数応答関数の概要

粘弾性ダンパーを用いたシステムの変位に関する周波数応答関数 $H(i\omega)$ は、式(1)で表される^[2]。

$$H(i\omega) = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + \frac{K'_a(\omega)}{K_f} + i \left(2\xi_0 \frac{\omega}{\omega_0} + \frac{K''_a(\omega)}{K_f}\right)} \cdot \frac{1}{K_f} \quad (1)$$

ここで、付加系の貯蔵剛性 $K'_a(\omega)$ 、損失係数 $\eta_a(\omega)$ および

損失剛性 $K''_a(\omega)$ は、式(2a,b,c)でそれぞれ算出できる^[1]。

$$K'_a(\omega) = \frac{\left\{ (1 + \eta_d^2(\omega))K'_d(\omega) + K_b \right\} K'_d(\omega) K_b}{(K'_d(\omega) + K_b)^2 + (\eta_d(\omega)K'_d(\omega))^2} \quad (2a)$$

$$\eta_a(\omega) = \frac{\eta_d(\omega)}{1 + (1 + \eta_d^2(\omega))K'_d(\omega)/K_b} \quad (2b)$$

$$K''_a(\omega) = K'_a(\omega) \cdot \eta_a(\omega) \quad (2c)$$

3.1. FD ダンパーの設定

粘弾性ダンパーのモデル化として FD モデルを用いる。FD モデルの特性は振動数 ω ($= 2\pi f$) に依存する。振動数で調和振動している際の、FD モデルの貯蔵剛性 $K'_d(\omega)$ および損失係数 $\eta_d(\omega)$ は、式(3a,b)でそれぞれ算出できる^[1]。

$$K'_d(\omega) = G \frac{1 + ab\omega^{2\alpha} + (a+b)\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)}{1 + a^2\omega^{2\alpha} + 2a\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \frac{A_s}{d} \quad (3a)$$

$$\eta_d(\omega) = \frac{(-a+b)\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)}{1 + ab\omega^{2\alpha} + (a+b)\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (3b)$$

ここで、 A_s = 粘弾性体のせん断面積、 d = 粘弾性体の厚さである。本研究では、粘弾性体材料をアクリル系 (住友 3M 製 ISD111) とし、温度 20°C でのパラメータは、 $G = 3.92 \times 10^4$, $a = 5.6 \times 10^{-5}$, $b = 2.10$, $\alpha = 0.558$ である^[1]。

3.2. Kelvin ダンパーの設定

Kelvin モデルの貯蔵剛性 $K'_d(\omega)$ および損失係数 $\eta_d(\omega)$ は、式(4a,b)でそれぞれ算出できる。

$$K'_d(\omega) = K'_d = K_k, \quad \eta_d(\omega) = C_k \cdot \omega / K_k \quad (4a, b)$$

3.3. Maxwell ダンパーの設定

Maxwell モデルの貯蔵剛性 $K'_d(\omega)$ および損失係数 $\eta_d(\omega)$ は、式(5a,b,c)でそれぞれ算出できる。

$$K'_d(\omega) = \frac{K_m (C_m \omega)^2}{K_m^2 + (C_m \omega)^2}, \quad \eta_d(\omega) = \frac{K_m^2 C_m \omega}{K_m (C_m \omega)^2} \quad (5a, b)$$

3.4. 4 要素ダンパーの設定

4 要素モデルの貯蔵剛性 $K'_d(\omega)$ 、損失剛性 $K''_d(\omega)$ および損失係数 $\eta_d(\omega)$ は、式(6a,b,c)でそれぞれ算出できる。

$$K'_d = \frac{A_s}{d} \left[a_1 + \frac{a_2 (b_2 \omega)^2}{a_2^2 + (b_2 \omega)^2} \right] \quad (6a)$$

$$K''_d = \frac{A_s}{d} \left[\frac{b_1 \{ a_2^2 + (b_2 \omega)^2 \} \omega + a_2^2 (b_2 \omega)}{a_2^2 + (b_2 \omega)^2} \right] \quad (6b)$$

$$\eta_d(\omega) = \frac{K''_d(\omega)}{K'_d(\omega)} \quad (6c)$$

3.5. 6 要素ダンパーの設定

6 要素モデルの貯蔵剛性 $K'_d(\omega)$ 、損失剛性 $K''_d(\omega)$ および損失係数 $\eta_d(\omega)$ は、式(7a,b,c)でそれぞれ算出できる。

$$K'_d = \frac{A_s}{d} \left[\sum_i \frac{a_i (b_i \omega)^2}{a_i^2 + (b_i \omega)^2} \right] \quad (7a)$$

$$K''_d = \frac{A_s}{d} \left[\sum_i \frac{a_i^2 (b_i \omega)}{a_i^2 + (b_i \omega)^2} \right] \quad (7b)$$

$$\eta_d(\omega) = \frac{K''_d(\omega)}{K'_d(\omega)} \quad (7c)$$

4. エネルギー入力の予測

t_a 秒内のエネルギー入力を E_{input} で表し、式(8)で求められる^[3]。

$$E_{input} = t_a \int_0^\infty R_e[\dot{H}(i\omega)] \cdot S_F(i\omega) d\omega \quad (8)$$

ただし、 $R_e[\]$ は $[\]$ 内の複素数の実数部分を取ることを表し、 $\dot{H}(i\omega) = i2\pi\omega H(i\omega)$ である。ここで、 $S_F(i\omega)$ = 1次モーダル風力のパワースペクトル密度である。

図(4)にエネルギー入力の予測結果を解析結果と比較を示す。図より、いずれの場合においても高い精度でエネルギー入力を予測できていることが分かる。

5. まとめ

本報では、振動数依存性を有する粘弾性ダンパーのエネルギー入力の予測手法を提案した。

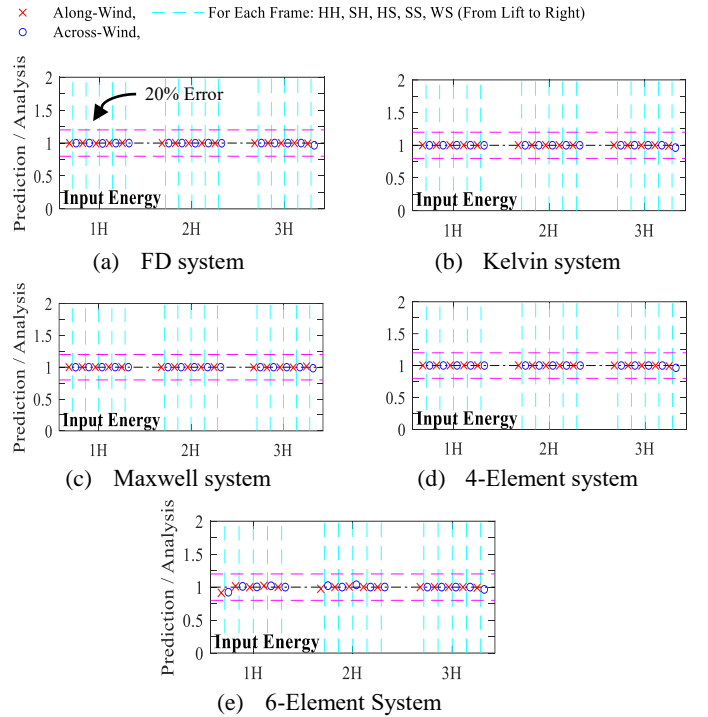


Fig. 4. Comparison of Input-Energy

謝辞

本研究は、JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (JPMJOP1723)、綿貫国際奨学財団の支援を受けました。

参考文献

- [1] 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, 66(543), 77-86.
- [2] 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎, 粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響. 日本建築学会構造系論文集, 74(635), 75-82.
- [3] 吉江慶佑, 北村春幸, 大熊武司: 変動風力による弾塑性構造物への総エネルギー入力に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 68, No. 572, pp. 31-38, 2003.10
- [4] 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2015

*東京工業大学環境・社会理工学院 大学院生

**東京工業大学未来産業技術研究所 准教授・博士 (工学)

* Doctoral Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology

** Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.