

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	長時間ランダム加振時の粘弾性ダンパーの動的特性変化の簡易予測
Title(English)	SIMPLIFIED METHOD TO PREDICT DYNAMIC CHARACTERISTICS DECREMENT OF VISCOELASTIC DAMPER UNDER LONG DURATION RANDOM VIBRATION
著者(和文)	奥田翔平, 佐藤大樹, OSABEL Dave
Authors(English)	Shohei Okuda, Daiki Sato, Dave M Osabel
出典(和文)	風工学シンポジウム講演梗概集, , No. 26, pp. 108-113
Citation(English)	National Symposium on Wind Engineering Proceeding, , No. 26, pp. 108-113
発行日 / Pub. date	2020, 11

長時間ランダム加振時の粘弾性ダンパーの動的特性変化の簡易予測

SIMPLIFIED METHOD TO PREDICT DYNAMIC CHARACTERISTICS DECREMENT OF VISCOELASTIC DAMPER UNDER LONG DURATION RANDOM VIBRATION

奥田 翔平¹⁾ 佐藤 大樹²⁾ Osabel Dave³⁾
Shohei OKUDA¹⁾, Daiki SATO²⁾ and OSABEL DAVE³⁾

ABSTRACT

Research interest in viscoelastic (VE) dampers as passive control device for high-rise buildings has been increasing due to the effectiveness of such dampers in dissipating not only the seismic vibration but also of the wind-induced vibrations. Evaluating the dynamic characteristics of VE dampers requires computationally-demanding analysis due to the complexity of the VE material properties. There has been proposed simplified method to predict the dynamic characteristics of VE dampers, but it was only applied and verified for harmonic loadings. Its accuracy for random loadings must be investigated since actual wind response of viscoelastically-damped high-rise building is random. In this paper, the authors propose a simplified method to predict the dynamic characteristics of VE dampers under long-duration random excitation such as wind.

Key Words: Viscoelastic damper, Simple prediction method, Random wave

1. はじめに

粘弾性ダンパーは地震力だけでなく風力まで効果的に振動エネルギーを吸収することから、高層建築に対する制振に有効な制振部材のひとつである¹⁾。しかし、粘弾性ダンパーは材料特性が振動時に複雑に変化するため、粘弾性ダンパーを有する建物を設計するときは、その材料特性変化に伴うダンパーの性能変化を考慮する必要がある。特に継続時間が長い振動時は、温度上昇に加え、熱伝導・伝達の影響も大きくなるため、粘弾性ダンパーを有する高層の制振構造建物においては、それらの影響を考慮した設計が求められる。文献 2), 3) においてこのような材料特性を考慮し動的特性を評価する解析手法・評価手法が提案されている。しかしこれらの手法は精度よくダンパーの特性変化を予測・評価することが可能であるが、解析をすること自体に高度な知識を必要とし、また実施できる環境・ソフトウェアを有することが必要となる。このような評価手法をより簡便・簡易的なものにするには、熱伝導・伝達の影響を考慮した制振構造の設計手法の構築に不可欠である。筆者らは文献 4) において高度な解析無しに粘弾性ダンパーの動的特性を予測する手法を提案し、正弦波加振実験との検証によりその有用性を確認した。しかし実際の風応答はランダムでありその精度については確認されていない。本報では、長時間ランダム波加振時における粘弾性ダンパーの動的特性変化の簡易的な予測法を提案し、ランダム波加振実験結果と比較しその精度を検証する。

^{1), 3)} 東京工業大学環境社会理工学院建築学系 大学院生, 博士 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)

²⁾ 東京工業大学未来産業研究所 准教授, (〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259)

2. 長時間加振実験の概要

2.1 ランダム波加振実験

本節では、文献 2) の粘弾性ダンパーの長時間ランダム波加振実験の概説を行う。詳細は文献 2) を参照されたい。この実験は、高さ 200m、幅・奥行が等しく 50m の超高層建物の風応答を対象としている。実験では建物固有周期、および減衰の異なる 4 つの対象建物モデルにおける風方向および風直交方向の風応答をもとに入力ランダム波を作成し、粘弾性ダンパーへの長時間加振実験を行い、その特性変化を確認している。

Table1 に入力ランダム波の諸元をまとめる。この実験において長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパーの特性変化に影響を与えるパラメータを検討するため、ダンパー変形の標準偏差が $\sigma_u = 5.0 \text{ mm}$ となるように基準化している。また風方向風力は平均成分を有するが、変動成分のみを用いている。なお、表中の記号は A: 風方向, C: 風直交方向, L: 低減衰 ($h=2\%$), H: 高減衰 ($h=10\%$) であり、数字は 1 質点系モデルの固有周期 T_0 を意味する。そして P.F.: ピークファクター (= 最大値/標準偏差), N_0^+ : 12000 秒間で変形波形がゼロ軸を正の傾きで超える数 (以下、繰り返し回数) である。また本実験に用いたアクリル系の粘弾性体は線形性が強く、ダンパーの最大変形 $u_{d,max}$ は本実験の振動数・温度において概ね線形とみなせる範囲にある。次に実験で使用した粘弾性ダンパーの詳細図を Fig.1 に示す。本実験では Fig.2 に示す点において、時間刻み $\Delta t = 1.0\text{s}$ として粘弾性ダンパーの温度を加振開始から終了まで計測した。このとき外気温は加振終了までの間、常に一定の温度 ($= 24^\circ\text{C}$) となるように維持した。一方、ダンパーの荷重と変位は $\Delta t = 0.01\text{s}$ として計測を行った。ただし計測を行う機器の容量上すべての時間で計測が行えないため、Fig.2 に示すように継続時間 12000 秒の間に 1200 秒ごとに約 80 秒間ずつのみ計測を行った。

Table1 Damper deformation (Random)

Case	u_d Max (mm)	u_d Min (mm)	σ_u (mm)	P.F.	N_0^+
A-3L	21.0	-20.6	5.0	4.2	3,452
A-3H	24.4	-16.9		4.9	2,018
A-6L	17.9	-16.6		3.6	1,728
A-6H	23.3	-16.2		4.7	1,296
C-3L	17.9	-17.4	5.0	3.6	3,460
C-3H	19.9	-19.6		4.0	1,820
C-6L	14.7	-16.0		3.2	1,780
C-6H	17.1	-20.4		4.1	1,580

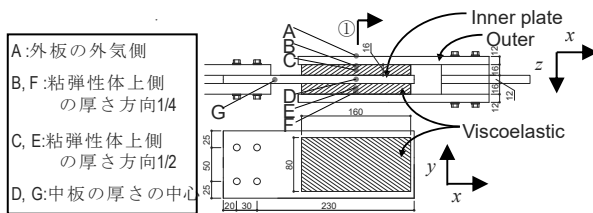


Fig.1 Viscoelastic damper details

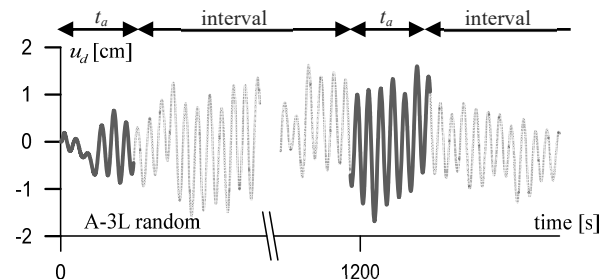


Fig.2 Displacement and force measurement time

2.2 正弦波置換法および正弦波加振実験

文献 2) においてランダム波加振実験に加え、正弦波置換法により作成された入力正弦波による長時間加振実験が行われている。この実験は正弦波置換法の実験的有用性を確認するために行われたものである。そして文献 4) において文献 2) の正弦波加振実験結果と簡易予測手法の比較を行い、予測手法の正弦波加振実験における有用性が確認された。本論文では正弦波置換法を用いることにより、文献 4) の正弦波加振時に有用な簡易予測法が、ランダム波加振時の動的特性の予測にまで拡張できることを示す。そのため本節では正弦波置換法について概説を行う。

正弦波置換法とは、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ーであるダンパー変形の標準偏差 σ_u 、繰り返し回数 N_0^+ 、および継続時間 t_a をもとに、ランダム波を一定の振幅と振動数で表される正弦波に置換する手法である。正弦波置換法により、置換振動数 f_r および置換振幅 A_r は、ランダム振動時のダンパー変形の繰り返し回数 N_0^+ 、継続時間 t_a 及び標準偏差 σ_u を用いて次式 (1), (2) より算出される。なお、 $\sqrt{2}$ は正弦波における理論値の P.F. を意味する。

$$f_r = \frac{N_0^+}{t_a}, \quad A_r = \sqrt{2}\sigma_u \quad (1,2)$$

Table2 に Table1 で示したランダム波の諸元値から式(1), (2)を用いて得られる置換正弦波の諸元を示す。そして Fig.3 に文献 2)の実験における代表的なケースとして A-3L と C-3L におけるランダム波とそれに対応する置換正弦波の入力ダンパー変形の時刻歴を示す。このようなランダム波および置換正弦波の加振実験を、文献 2)では 4 つのモデル, 2 方向について行っている。

Case	t_a (s)	A_r (mm)	f_r (Hz)	$\dot{u}_d$ Max (mm/s)
A-3L	12,000	7.07	0.288	12.79
A-3H			0.168	7.46
A-6L			0.144	6.40
A-6H			0.108	4.80
C-3L	12,000	7.07	0.288	12.79
C-3H			0.152	6.75
C-6L			0.148	6.57
C-6H			0.132	5.86

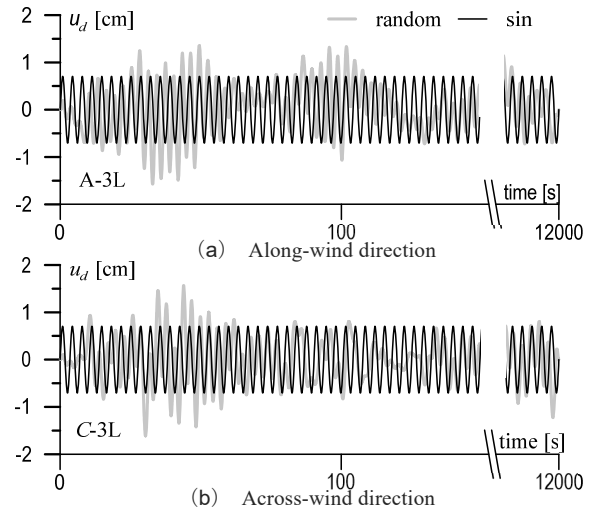


Fig.3 Random and sinusoidal wave

3. 動的特性簡易予測法

文献 4)において長時間正弦波振動時の粘弾性ダンパーの定常状態および過渡状態の温度・動的特性を簡易的に予測する手法がそれぞれ示された。本章ではその手法を概説したのち、その簡易予測手法を拡張し、ランダム加振振動時の動的特性を簡易的に予測できる方法(動的特性簡易予測法)を提案する。

3.1 正弦波加振時の履歴と解析モデル式

本節では粘弾性ダンパーを簡易的にモデル化および定常状態の簡易予測法に必要な定常状態の粘弾性ダンパーの内部温度分布式の導出を概説する。そしてこの式を用い、3.3 節の手順により粘弾性ダンパーの定常時の特性を予測する手法を示す。

粘弾性ダンパーをモデル化する上で、鉄板は熱伝導率が粘弾性体に比べ、極めて大きい(約 230 倍)⁵⁾ため無視し、粘弾性体を厚み方向の一次元体として考える。そして一次元体は、振動エネルギー入力により発熱しながら、両端から熱伝達により熱放出を行い定常状態になるとする。Fig.4 にモデル化の概念図を示す。定常状態となった時のそれぞれの面の温度を θ_1 , θ_2 とする。空気温度 θ_a , 熱伝導率 κ , 熱伝達係数 α_{c1} , α_{c2} , 単位時間単位体積当たりの内部発熱量 $\dot{Q}$, 比熱 s , 密度 ρ , モデルの長さを d_v とする。

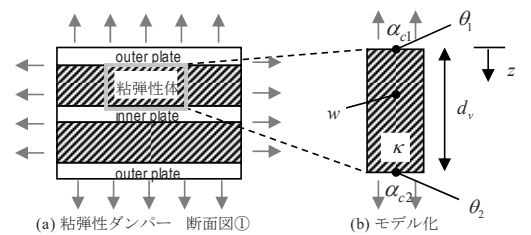


Fig.4 1D model of VE damper

このとき以下の 3 式が成り立つ⁵⁾。

$$\frac{\kappa}{s\rho} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{\dot{Q}}{s\rho} = 0, \quad \frac{\alpha_{c1}}{\kappa} (\theta_1 - \theta_a) - \left(\frac{\partial \theta(0)}{\partial z} \right) = 0, \quad \frac{\alpha_{c2}}{\kappa} (\theta_2 - \theta_a) + \left(\frac{\partial \theta(d_v)}{\partial z} \right) = 0 \quad (3-5)$$

これらの式より一次元体の内部温度分布は以下の式で表される。ただし A は以下の式で表される。

$$\theta(z) = -\frac{1}{2} \frac{\dot{Q}}{\kappa} \left(z - \frac{\alpha_{c1}}{\dot{Q}} A \right)^2 + \frac{\alpha_{c1}^2}{2\dot{Q}\kappa} A^2 + A + \theta_a, \quad A = \frac{(\alpha_{c2} d_v + 2\kappa) \dot{Q} d_v}{2(\alpha_{c1} \alpha_{c2} d_v + \alpha_{c1} \kappa + \alpha_{c2} \kappa)} \quad (6,7)$$

よって最大温度 θ_{max} 及びその位置 z_{max} は以下の式で表される。

$$\theta_{max} = \frac{\alpha_{c1}^2}{2w\kappa} A^2 + A + \theta_a, \quad z_{max} = \frac{\alpha_{c1}}{\dot{Q}} A \quad (8,9)$$

3.2 正弦波加振時の履歴と解析モデル式

本節では 3.3 節および 3.4 節の予測法で使用する粘弾性ダンパーの正弦波加振時の理論式および粘弾性体の温度振動数依存性を考慮できる解析モデル式の概説を行う。

Fig.5 に粘弾性ダンパーに正弦波が加振されたときの履歴を示す。ここで K'_d : 貯蔵剛性, C_d : 粘性係数, η_d : 損失係数, W_d : エネルギー吸収量, $u_{d,max}$: 最大変位, ω ($=2\pi/T$): 固有円振動数である。

このとき単位時間当たり単位体積あたりの発熱量 $\dot{Q}$ は, 振動の周期を T , 粘弾性ダンパーの体積を V とすると 1 サイクル当たりのエネルギー吸収量 W_d をもとに次式より求められる。なおエネルギー吸収量 W_d は履歴の楕円の面積で求められ, 以下の式によって算出される。

$$\dot{Q} = \frac{W_d}{VT}, \quad W_d = \pi \eta_d K'_d u_{d,max}^2 \quad (10,11)$$

ここで貯蔵剛性 K'_d , 損失係数 η_d , については粘弾性体の温度振動数依存性を考慮することのできる分数微分モデルから算出している。以下にその式を示す。

$$K'_d = G \frac{1 + ab\omega^{2\alpha} + (a+b)\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)}{1 + a^2\omega^{2\alpha} + 2a\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \frac{A_s}{d_v}, \quad \eta_d = \frac{(-a+b)\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)}{1 + ab\omega^{2\alpha} + (a+b)\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (12,13)$$

ここでは分数微分の次数 α , そして G, a, b は構成則のパラメータであり, とくに a, b は温度に依存し次式で求まる。なお a_{ref}, b_{ref} は基準温度 (20℃) における a, b の値であり, また λ は温度を考慮するシフトファクターで以下の式から求める。

$$a = a_{ref} \lambda^\alpha, \quad b = b_{ref} \lambda^\alpha, \quad \lambda = \exp\left[-p_1(\theta - \theta_{ref}) / p_2 + \theta - \theta_{ref}\right] \quad (14-16)$$

ここで θ_{ref} は基準温度, θ は粘弾性ダンパーの温度を表す。

3.3 SSP 手法 (Steady State Prediction)

本節では 3.1 節, 3.2 節で示した式を利用し, 長時間加振時の粘弾性ダンパーの定常状態の特性の簡易予測手法, 定常時予測法 (Steady State Prediction / SSP 手法) を示す。Fig.6 に SSP 手法のフロー, Fig.7 にその概念図を示す。以下に詳しくフローの説明をする。始めに周辺温度 θ_a で K'_d および η_d を式 (12), (13) より算出する。その値により発熱量 $\dot{Q}$ を式 (10), 式 (11) より求め, そして式 (8), (9) よりダンパー内部の最大温度 θ_{max} を算出する。次にその温度を基にして, 再度ダンパーの K'_d および η_d を計算しなおし, それに応じて発熱量 $\dot{Q}$, ダンパー温度 θ_{max} を求めなおす。以上の操作をダンパー内部の最大温度 θ_{max} が収斂するまで n 回繰り返す。この収束した値をダンパーの定常温度 θ_{SSP} とし, この温度において定まる各特性値をダンパーの定常状態における特性値とする。なお n の決め方については文献 4) を参照されたい。

3.4 SDP 手法 (Short Duration Prediction)

3.3 節の SSP 手法は長時間振動が加わった後の動的特性を予測できるが, 定常状態になるまでの過渡状態の特性については明らかでない。そこで本節では, 過渡状態の特性の簡易予測法, SDP 手法 (Short Duration Prediction-Method) を示す。この手法では熱伝達による熱放出を考慮せずに材料特性変化を考え

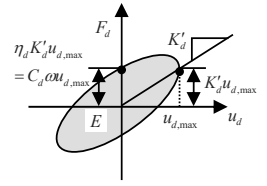
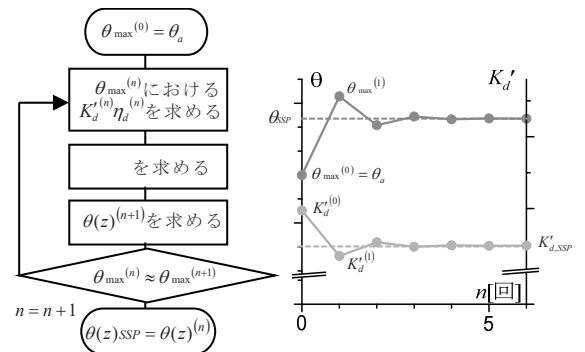


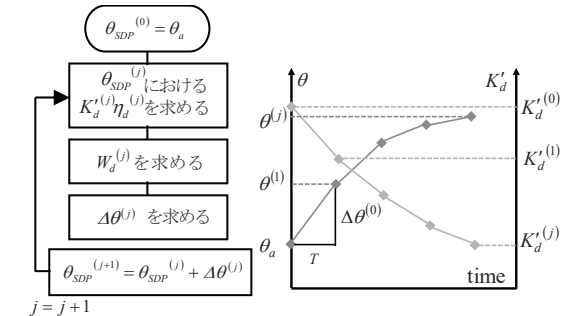
Fig.5 Loop for sinusoidal wave



< n : 収斂回数 >

Fig.6 Flow of SSP

Fig.7 Concept of SSP



< j : サイクル回数 >

Fig.8 Flow of SDP

Fig.9 Concept of SDP

る。なお、この仮定は粘弾性体の熱伝達率が大きいことを考慮すると、継続時間の短い場合では妥当と言える。Fig.8 に SDP 手法のフロー、Fig.9 にその概念図を示す。ただし j : サイクル数である。以下にフローの詳しい説明を行う。始めに周辺温度 θ_a でダンパーの K'_d および η_d を式 (12), (13) より算出する。以上の値よりエネルギー吸収量 $W_d^{(j)}$ を式 (11) より求める。そして以下の式を用い、温度上昇幅 $\theta^{(j)}$ を算出する。

$$\Delta\theta^{(j)} = \frac{W_d^{(j)}}{s\rho V} \quad (17)$$

次に温度上昇幅 $\Delta\theta^{(j)}$ を用い、次サイクルの温度 $\theta^{(j+1)}$ を以下の式より求める。

$$\theta^{(j+1)} = \theta^{(j)} + \Delta\theta^{(j)} \quad (18)$$

そして $\theta^{(j+1)}$ を用いて、ダンパーの K'_d および η_d を求めなおし、再び同じ操作を行う。以上のことを繰り返すことにより発熱のみを考慮したダンパーの特性値を求めることができる。そして本手法で求められる j サイクル目における温度を $\theta_{SDP}^{(j)}$ とする。本節の手法で求まる温度 $\theta_{SDP}^{(j)}$ が 3.3 節の手法で求まる温度 θ_{SSP} を超えるまで、 $\theta_{SDP}^{(j)}$ で K'_d および η_d を評価することで、定常状態に加え、過渡状態もダンパーの特性を評価できる。このようにして 2 つの簡易予測手法を組み合わせた手法を、動的特性簡易予測法 (Simplified Prediction method of Dynamic Characteristics: SPDC) と呼ぶこととする。Fig.10 に SPDC 手法の概念図を示す。Fig.10 のように SSP, SDP を組み合わせて SPDC としている。また 3.3 節, 3.4 節より本手法は正弦波加振時の理論に基づいていることがわかるが、2.2 節で説明した通り、あるランダム波が与えられたとき正弦波置換法によって正弦波に変換することができるため、この予測法がランダム波に対しても使用可能である。

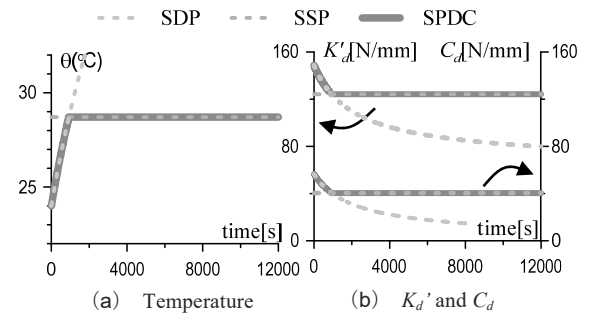


Fig.10 The way to combine SDP and SSP

4. 実験結果との比較

動的特性簡易予測法 (SPDC 手法) の予測値とランダム波加振実験を比較する。予測値の算出において使用したモデルの各パラメータは、 $\alpha = 0.558$, $G = 0.0392 \text{ N/mm}^2$, $a_{ref} = 5.6 \times 10^{-3}$, $b_{ref} = 2.10$, $p_1 = 14.06$, $p_2 = 97.32$, $\theta_{ref} = 20^\circ\text{C}$, $s\rho = 0.188 \text{ N/s}^\circ\text{C}$ である。また、熱伝達係数 α_{c1} , α_{c2} は Table3 で示した値²⁾を用いている。熱伝達係数の決定方法の詳細については文献 2) を参照されたい。

Fig.11 に、各ケースにおけるランダム波および正弦波加振実験により得られた C 点における温度時刻歴の結果とそれぞれのケースの SPDC 手法の予測値を重ねて示す。Fig.11 より全てのケースについて SPDC 手法によって精度よく温度が予測できていることが確認できる。同様に Fig.12 にランダム波および正弦波加振実験により得られる貯蔵剛性 K'_d の時間変化、粘性係数 C_d の時間変化とそれぞれのケースの SPDC 手法の予測値を重ねて示す。Fig.12 よりほとんどのケースにおいて動的特性簡易予測法によって精度よく動的特性が予測できていることが確認できる。一方で精度よく予測できていないケースとしてランダム波加振の A-3H が挙げられる。この誤差については今後の課題とする。

5. まとめ

本報では、解析条件を簡易化した上でも、熱伝導・伝達を考慮し、かつ粘弾性ダンパーの温度・振動数依存性を考慮した性能評価を行う簡易評価手法、動的特性簡易予測法 (SPDC 手法) を提案した。また文献 2) の長時間ランダム波加振実験結果とその手法の予測値を比較することでその精度を確認した。以下に本論文で得られた知見を示す。

(1) SSP 手法と SDP 手法および正弦波置換法を組み合わせることで、長時間ランダム加振時の粘弾性ダンパーの温

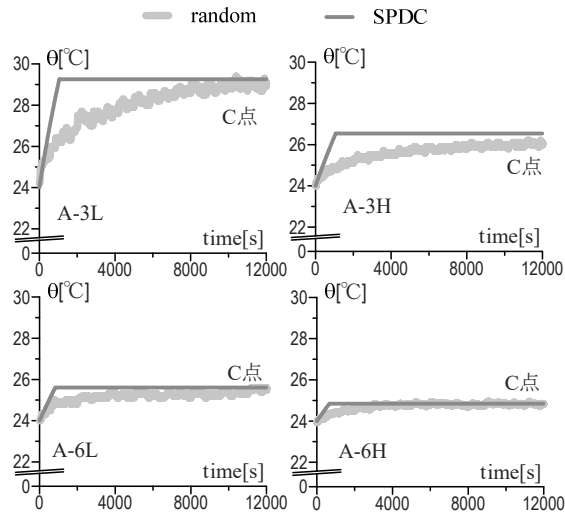
Table3 Heat transfer condition

case	$\alpha_{c1} [\text{N/s/mm}^\circ\text{C}]$	$\alpha_{c2} [\text{N/s/mm}^\circ\text{C}]$
A-3L	0.023	0.011
A-3H	0.026	0.012
A-6L	0.040	0.018
A-6H	0.067	0.027
C-3L	0.023	0.011
C-3H	0.036	0.016
C-6L	0.028	0.013
C-6H	0.038	0.017

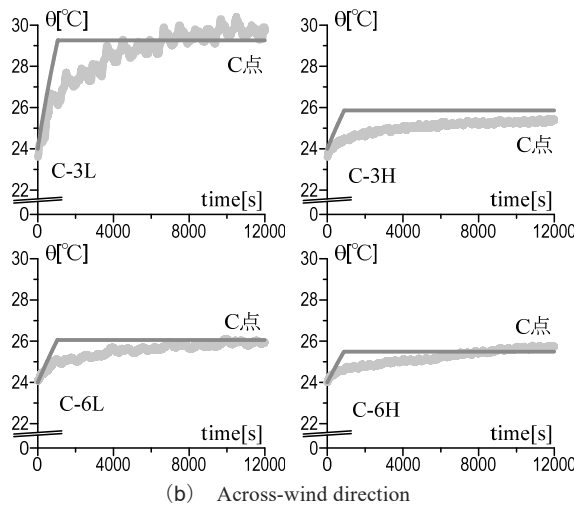
度および動的特性を簡易的に予測する動的特性簡易予測法 (SPDC 手法) を提案した。

(2) 文献 2) のランダム波加振実験結果と動的特性簡易予測法の予測値を比較することで、ほとんどのケースで温度及び特性を予測できていることが確認された。

今後は本手法を用いて長時間振動時における粘弾性ダンパーの性能低下を考慮した制振構造の設計手法を構築する予定である。

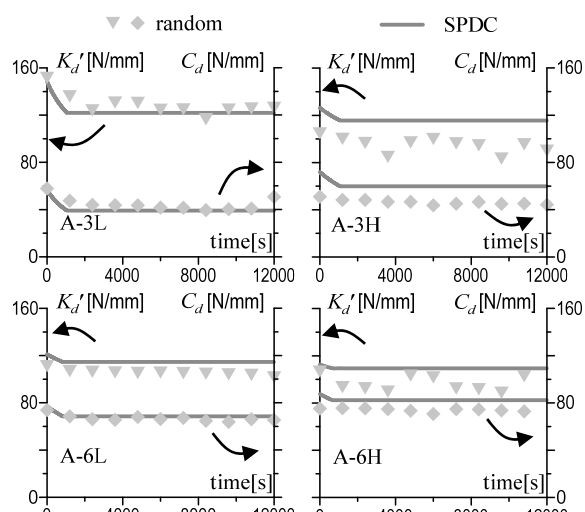


(a) Along-wind direction

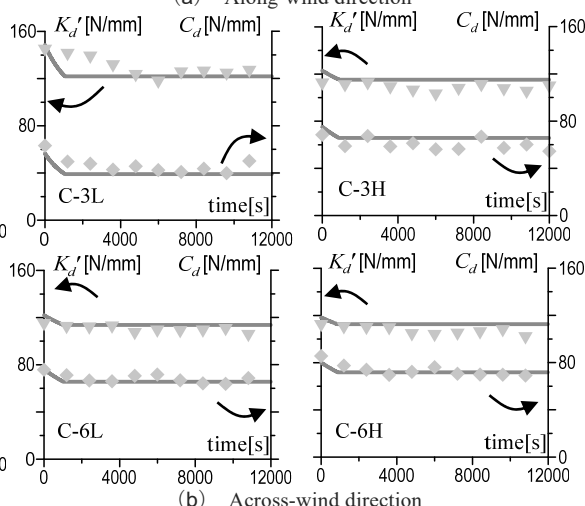


(b) Across-wind direction

Fig.11 Test vs SDPC temperature



(a) Along-wind direction



(b) Across-wind direction

Fig.12 Test vs SDPC K_d' and C_d

参考文献

- 1) 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3版, 2013.11
- 2) 佐藤大樹, 所健, 笠井和彦, 北村春幸: 風応答振動時における粘弾性ダンパーの特性および正弦波による簡易評価手法, 日本建築学会構造系論文集, 第80巻, 第710号, pp.571-581, 2015.4
- 3) 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
- 4) 奥田 翔平, 佐藤大樹: 長時間加振時の粘弾性ダンパーの動的特性変化簡易予測, 日本建築学会大会学術講演梗概論文集, pp.143-144, 2020.9
- 5) 西川兼康, 北山直方: 図解伝熱工学の学び方, オーム社, 1982.1.20