

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	長時間加振時における実大複層粘弾性ダンパーの熱伝導・伝達を考慮した数値モデル その1 吸熱量の導入と解析手法
Title(English)	Mathematical model for full-scale multi-layered viscoelastic dampers subjected to longduration loading considering the effect of heat transfer, part1
著者(和文)	LIANGQIJUN, 奥田翔平, Osabel Dave, 佐藤大樹
Authors(English)	Qijun Liang, Shohei Okuda, Dave M Osabel, Daiki Sato
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , , pp. 471-472
Citation(English)	, , , pp. 471-472
発行日 / Pub. date	2022, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

長時間加振時における実大複層粘弾性ダンパーの熱伝導・伝達を考慮した数値モデル

その1 吸熱量の導入と解析手法

複層粘弾性ダンパー 熱伝導・伝達 一次元モデル
時刻歴解析手法 簡易予測手法

正会員 ○梁其峻*1 同 奥田翔平*3
同 Osabel Dave*1 同 佐藤大樹*2

1. はじめに

粘弾性ダンパーは地震・風の両方の制振に有効な部材の1つである¹⁾。しかし、粘弾性体が温度依存性を持つため、振動時に剛性や粘性といった動的特性値が発熱・熱伝導・伝達の影響を受けながら低下するという特徴を有する²⁾。そのため文献2)や3)にてそれらの影響を考慮した解析・予測手法が提案された。しかし、これらの手法は既存の一次元熱伝導方程式を適用できる2層ダンパー(図1上)を対象とした手法であり、複層ダンパー(図1下)への適用方法は課題であった。本報その1では、吸熱量を導入することにより、文献2)の手法を拡張した複層ダンパーの解析手法を示す。また、文献3)の予測手法の拡張の前段階として、用いる諸式について示す。

2. 実験概要

本章では、各提案手法において対象とした文献4)の複層ダンパーの加振実験について概説する。表1に各ケースにおける入力波の諸元と各部分の空気温度を示す。また試験体のダンパーの詳細を図2に示す。本実験は高さ200mの超高層建物の風応答を想定した実験で、ランダム波とそれと等価な置換正弦波⁵⁾を変形 ud として t_a 秒間入力した。そして反力 F_d と計測点1~6の温度の測定を行った。

3. 内部吸熱量の導入

粘弾性ダンパーは粘弾性体の振動エネルギー吸収により発熱し、同時に空気への放熱が主に鋼板から行われるが、既往の一次元体ではその両端でしか放熱の影響を考慮できず、一次元化する鋼板が外板と内板のみの2層ダンパーへの適応に留まっている。本報では複層ダンパーの中板での放熱の影響を考慮するため、吸熱量 Q_N および内部吸熱量 \dot{Q}_N を導入する。これらは一次元体の任意の箇所での放熱の影響を考慮できる変数であり、吸熱量 Q_N は対象物における空気への放熱量と等しい負の発熱量(単位時間当たりが発生する熱量)、内部吸熱量 \dot{Q}_N は単位体積当たりの吸熱量である。これらは図3の要素 m において $\dot{Q}_N = Q_N/A_c d_m$ に注意し、次式で定義する。

$$Q_{N,m} = \alpha_{ceq,m} \left(\frac{\theta_m + \theta_{m-1}}{2} - \theta_a \right) A_c, \quad \dot{Q}_{N,m} = \frac{\alpha_{ceq,m} (\theta_m + \theta_{m-1} - 2\theta_a)}{2d_m} \quad (1a,b)$$

ここで α_{ceq} : 等価熱伝達係数であり、吸熱量 Q_N を定める定数である。また、このとき図3の一次元要素の定常状態(=発熱量と放熱量の釣り合う状態)における内部温度分布 $\theta_m(z_m)$ と中心温度 $\theta_{mid,m}$ は図3中の式(2)~(4)でそれぞれ表される。

表1 入力波の諸元

Random wave					
Case	σ_a [mm]	N_0^*	t_a [s]	$\theta_{a,VEp}$	θ_a
A-3L-30	4.00	208	28800	30°C	22°C
A-3H-28	4.00	107	32400	28°C	22°C
Equivalent Sinusoidal wave					
Case	A_r [mm]	f_r [mm]	t_a [s]	$\theta_{a,VEp}$	θ_a
A-3L-30	5.66	0.277	28800	30°C	22°C
A-3H-28	5.66	0.142	30000	28°C	22°C

A_r : 置換振幅 f_r : 置換振動数 t_a : 加振時間 σ_a : 標準偏差 N_0^* : 繰り返し数 θ_a : 空気温度 *VEp: VE panel part の意

図1 2層ダンパーと複層ダンパー

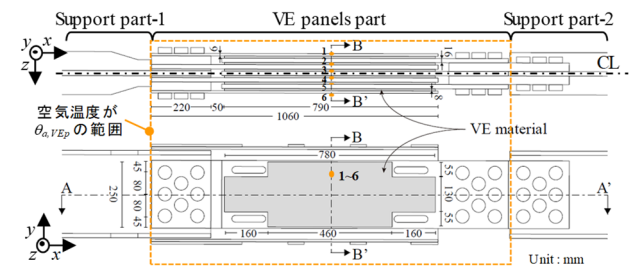
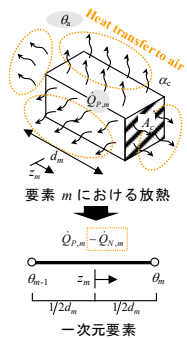


図2 実大複層ダンパーの詳細図



一次元要素の内部温度分布式

$$\theta_m(z_m) = -\frac{1}{2\kappa_m d_m} \left\{ \dot{Q}_{p,m} d_m - \alpha_{ceq,m} (B_m - \theta_a) \right\} z_m^2 + A_m z_m + B_m + \frac{d_m}{8\kappa_m} \left\{ \dot{Q}_{p,m} d_m - \alpha_{ceq,m} (B_m - \theta_a) \right\} \quad \dots(2)$$

$$A_m = (\theta_m - \theta_{m-1})/d_m \quad \dots(3a) \quad B_m = (\theta_m + \theta_{m-1})/2 \quad \dots(3b)$$

$$\theta_{mid,m} = B_m + \frac{d_m}{8\kappa_m} \left\{ \dot{Q}_{p,m} d_m - \alpha_{ceq,m} (B_m - \theta_a) \right\} \quad \dots(4)$$

α_c : 熱伝達係数 d_m : 要素厚 $\dot{Q}_{p,m}$: 内部発熱量
 θ_m : 節点温度 θ_a : 空気温度 A_c : 断面積 z_m : 要素の中心

図3 一次元要素の吸熱量と内部温度分布

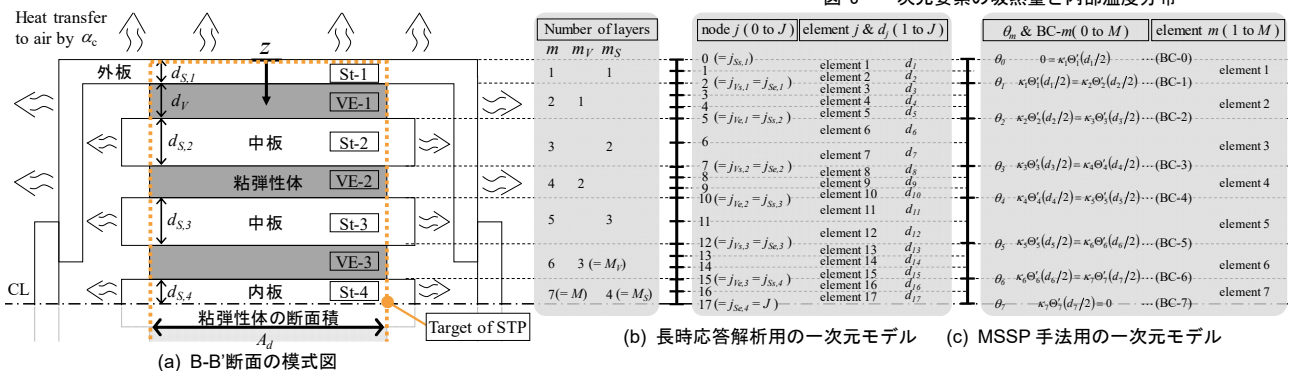


図4 複層ダンパーの一次元モデル化と要素分割の例

Mathematical model for full-scale multi-layered viscoelastic dampers subjected to long-duration loading considering the effect of heat transfer, part I

Liang Qijun, Okuda Shohei, Sato Daiki, Osabel Dave

4. 複層ダンパーの長時応答解析手法

内部吸熱量 \dot{Q}_N を用いて文献 2) の解析手法を拡張し、複層ダンパーの長時応答解析手法 (以後、解析) を提案する。図 4(a) に図 2 のダンパーの B-B' 断面の上半分の模式図を示す。本解析では図 4(a) を図 4(b) のように粘弾性体厚み方向 (z 軸方向) に一次元化する。図 5 に解析で用いる式・パラメータを、図 6 に解析の手順を示す。Step-1 にて与えられた変位 $u_d^{(n)}$ に対して、式(5), (6) より各粘弾性体要素の剪断応力 τ_{m_j} ・歪 γ_j を求める。ここで各パラメータおよびこのときのダンパー力 $F_d^{(n)}$ は式(7)~(13) で求まる。なお、式(5), (6) は、変位の適合条件式と各粘弾性体要素の節点に成立する分数微分構成則の数値積分式²⁾を連立し、各粘弾性体層内で剪断応力 τ_{m_j} が z 軸方向に一定となることを用いて整理すると導出される。Step-2 にて粘弾性体の発熱を考慮するため各粘弾性体要素の内部発熱量の増分 $\Delta\dot{Q}_{P,j}$ を式(14) から求め、Step-3 にて鋼板からの放熱を考慮するため各鋼板要素の内部吸熱量の増分 $\Delta\dot{Q}_{N,j}$ を式(15) より求める。なお、式(15) は式(1b) における θ_m 、 θ_{m-1} を

各要素の剪断応力・歪		分数微分構成則の変数 ^{6),7)}	
$\tau_{m_j}^{(n)} = \frac{2u_d^{(n)} - \sum_{j=J_{v,m_j}}^{J_{v,m_j}} \frac{\zeta_j(\tilde{A}_j - \tilde{B}_j)}{G_j(\Delta t^\alpha + b_j W^{(0)})}}{\sum_{j=J_{v,m_j}}^{J_{v,m_j}} \frac{\zeta_j(\Delta t^\alpha + a_j W^{(0)})}{G_j(\Delta t^\alpha + b_j W^{(0)})}} \quad \dots(5)$		$a_j = a_{ref} \lambda_j^\alpha \quad \dots(9a) \quad G_j = G_{ref} \lambda_{2,j}^\alpha \quad \dots(9b)$	
$\gamma_j^{(n)} = \frac{\tau_{m_j}^{(n)}(\Delta t^\alpha + a_j W^{(0)}) + \tilde{A}_j - \tilde{B}_j}{G_j(\Delta t^\alpha + b_j W^{(0)})} \quad \dots(6)$		$b_j = b_{ref} \lambda_j^\alpha \lambda_{1,j} \quad \dots(9c)$	
$\tilde{A}_j = a_j \sum_{i=1}^N W^{(i)} \tau_{m_j}^{(n-i)} \quad \tilde{B}_j = G_j b_j \sum_{i=1}^N W^{(i)} \gamma_j^{(n-i)} \quad \dots(7a) \quad \dots(7b)$		$\lambda_j = e^{(-\rho_1(\theta_j^{(n)} - \theta_{ref}) + \rho_2 + \theta_j^{(n)} - \theta_{ref})} \quad \dots(10a)$	
$\zeta_{j_{v,m_j}} = d_{j_{v,m_j}} \quad \dots(8a) \quad \zeta_{j_{v,m_j}} = d_{j_{v,m_j+1}} \quad \dots(8b)$		$\lambda_{2,j} = 1 + C_{2,j} (\gamma_{max,j} - 1) \quad \dots(10b)$	
$\zeta_j = d_j + d_{j+1} \quad \dots(8c) \quad (j = j_{v,m_j} \sim j_{v,m_{j+1}}) \quad \& (m_j = 1 \sim M_j)$		$\lambda_{1,j} = 1 + C_{1,j} (\gamma_{max,j} - 1) \quad \dots(10c)$	
$F_d^{(n)} = \left(\sum_{m_j=1}^{M_j} \tau_{m_j}^{(n)} / M_j \right) A_s \quad \dots(11)$		$C_1 = 0.124 \quad C_2 = -0.182 \quad (1 \leq \gamma_{max})$ $C_1 = C_2 = 0 \quad (1 > \gamma_{max})$	
ダンパーの反力 ²⁾			
数値積分に関する変数 ⁶⁾			
$W^{(0)} = 1/\Gamma(2-\alpha) \quad \dots(12a) \quad W^{(i)} = [(i-1)^{-1-\alpha} - 2i^{1-\alpha} + (1+i)^{1-\alpha}] / \Gamma(2-\alpha) \quad \dots(12b)$			
$W^{(n)} = [(n-1)^{-1-\alpha} - n^{1-\alpha} + (1-\alpha)n^{-\alpha}] / \Gamma(2-\alpha) \quad \dots(12c) \quad N = T_w / \Delta t \quad \dots(13)$			
各要素の内部発熱量・吸熱量の増分			
$\Delta\dot{Q}_{P,j} = (\tau_{m_j}^{(n)} + \tau_{m_j}^{(n-1)}) (\gamma_j^{(n)} - \gamma_j^{(n-1)}) / 4 \quad \dots(14) \quad (j = j_{v,m_j} + 1 \sim j_{v,m_{j+1}}) \quad \& (m_j = 1 \sim M_j)$			
$\Delta\dot{Q}_{N,j} = \dot{Q}_{N,j} \Delta t = \alpha_{ceq,m_j} \left(\frac{\theta_j + \theta_{j-1} - \theta_a}{2} - \theta_a \right) \Delta t / d_{s,m_j} \quad \dots(15) \quad (j = j_{s,m_j} + 1 \sim j_{s,m_{j+1}}) \quad \& (m_s = 1 \sim M_s)$			
$\Delta\dot{Q}_j = \Delta\dot{Q}_{P,j} - \Delta\dot{Q}_{N,j} \quad \dots(16) \quad (j = 1 \sim J)$			
各要素の吸収エネルギーによる温度上昇 ²⁾		熱伝導による温度上昇・下降 ²⁾	
$\Delta\theta_j^{(n)} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\dot{Q}_j}{s_j \rho_j} + \frac{\Delta\dot{Q}_{j+1}}{s_{j+1} \rho_{j+1}} \right) \quad (j = 2 \sim J-1) \quad \dots(17a)$		$\bar{\theta}_j^{(n)} = \sum_{k=0}^k x_{k,j} \theta_k^{(n)} + y_j \quad \dots(18)$	
$\Delta\theta_0^{(n)} = \Delta\dot{Q}_1 / (2s_1 \rho_1) \quad \Delta\theta_J^{(n)} = \Delta\dot{Q}_J / (2s_J \rho_J) \quad \dots(17b)$		$\theta_j^{(n+1)} = \Delta\theta_j^{(n)} + \bar{\theta}_j^{(n)} \quad \dots(19)$	
次ステップの温度 ²⁾			
A_s : 総断面積 d_s : 鋼板の厚み τ : 剪断応力 γ : 剪断歪 Δt : 刻み時間 G_{ref} : 剪断剛性 i : ステップ ($i=0 \sim n$) j : 節点番号 α : 分数微分の次数 J_{Se} : 鋼板の終了節点番号 J_{Ss} : 鋼板の開始節点番号 J_{Vs} : 粘弾性体の開始節点番号 J_{Ve} : 粘弾性体の終了節点番号 J : 全要素数 m : 層番号 m_s : 鋼板の層番号 m_p : 粘弾性体の層番号 M : 全層数 M_s : 鋼板の層数 M_p : 粘弾性体の層数 n : 現ステップ N : 数値積分点の数 Δ : 増分 \dot{Q} : 吸収エネルギー密度 \dot{Q}_N : 内部吸熱量 \dot{Q}_P : 内部発熱 w : 分数微分の重み係数 T_w : window time θ : 節点温度 θ_{ref} : 基準温度 κ : 熱伝導率 s : 比熱 ρ : 密度 λ : 温度依存性用のシフトファクター λ_1, λ_2 : 大歪による軟化現象用の係数 γ_{max} : 経験最大歪 $\bar{\theta}^{(n)}$: 熱伝導・伝達による温度上昇または下降			

図 5 長時応答解析に用いる諸式

θ_j 、 θ_{j-1} とし、また $\alpha_{ceq,m}$ を α_{ceq,m_s} に、 d_m を d_{s,m_s} に置き換えた式である。Step-4 では式(16)より各要素の吸収エネルギー密度の増分 $\Delta\dot{Q}_j$ を求め、式(17)より各節点の温度上昇幅 $\Delta\theta_j^{(n)}$ を求める。最後に Step-5 にて Δt 秒間の熱伝導による各節点の温度変化を式(18)から求め、Step-6 にて式(19)より各節点の次ステップ温度 $\theta_j^{(n+1)}$ を求める。以上を繰り返すことによりダンパーの応力歪・温度分布を時系列で求められる。

5. 内部温度分布と正弦波加振時の特性値

本節ではその 2 で提案する予測手法で用いる定常状態における複層ダンパーの内部温度分布式および正弦波加振時の動的特性値に関する諸式を示す。図 4(c) に示す複層ダンパーの一次元体において、成立する境界条件式群 (図 4 中 BC-1~7) に式(2)の微分式を代入して θ_m について解くと、図 7 に示す式(20)~(22)を得る。これらの式より θ_m が求まり、式(2)~(4)から各層の内部温度分布式を算出できる。

図 8 に正弦波加振時の F_d - u_d の履歴と τ - γ の履歴を示す。ここで、それぞれの履歴の傾きは K'_d 、 G' であり、各動的特性値、粘弾性体の吸収エネルギー量 W_d 、内部発熱量 \dot{Q}_{PV} は図 8 中の式(23)~(26)より求められる¹⁾。なお、式(24)中のパラメータは図 5 中の式(9), (10)より求められる。ただし、 $C_1=C_2=0$ である。

6. おわりに

本報その 1 では、吸熱量を導入することにより、文献 2) の解析手法を拡張し、複層ダンパーに適用した。また、文献 3) の予測手法の拡張の前段階として、用いる諸式について示した。解析結果についてはその 2 に示す。

参考文献はその 2 にまとめて示す。

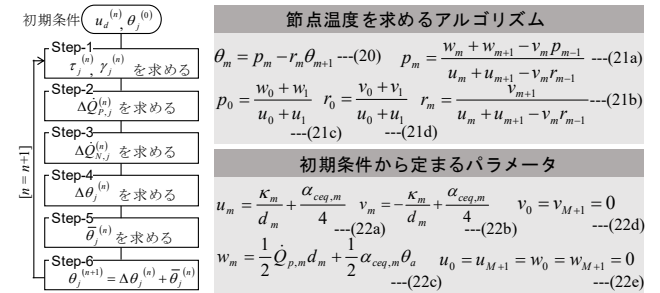


図 6 解析の手順

図 7 θ_m の決定に必要な諸式

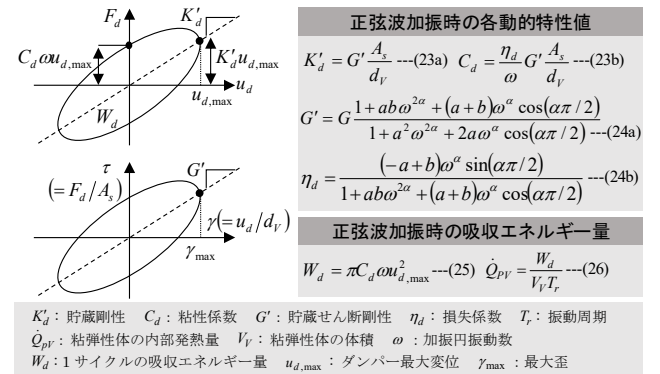


図 8 正弦波加振時の履歴と動的特性値を求める諸式

*1 東京工業大学

*2 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授・博士 (工学)

*3 元東京工業大学大学院生 修士 (工学)

*1 Tokyo Institute of Technology

*2 Assoc. Prof., FIRIST, Tokyo Institute of Technology

*3 Former Graduate Student, Tokyo Institute of Technology