

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	熱伝導・伝達による動的特性変化を考慮した実大複層粘弾性ダンパーの解析手法
Title(English)	Analysis methods of full-scale multi-layered viscoelastic dampers subjected to longduration loading considering dynamic property change with the effect of heat transfer
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 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 313-316
Citation(English)	, , , pp. 313-316
発行日 / Pub. date	2022, 3

熱伝導・伝達による動的特性変化を考慮した実大複層粘弾性ダンパーの解析手法

構造—振動

正会員 ○ 奥田翔平 *1

正会員 佐藤大樹 *2

// Osabel Dave *3

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 温度・振動数依存性

1 はじめに

粘弾性ダンパーは地震および風に有効な制振部材の1つである¹⁾。しかし、粘弾性ダンパーは、粘弾性体の温度依存性から熱伝導・伝達の影響大きく受け、振動時に性能が複雑に変化することが特徴として挙げられる²⁾。そのため粘弾性ダンパーを有する建物では、熱伝導・伝達の影響による性能変化を考慮して設計する必要があり、研究が進められている^{例えば、2),3)}。そうした研究の1つに文献2)がある。文献2)では粘弾性体の温度・振動数依存性を再現する分数微分構成則^{4),5)}と一次元非定常熱伝導解析を組み合わせることにより、長時間加振時の粘弾性ダンパーの温度分布や履歴曲線の変化を高精度に再現できる解析手法が提案されている。しかし、この解析手法はダンパーの一次元モデル化を容易に行える2層せん断型粘弾性ダンパー(以下、2層ダンパー、Fig.1(a)参照)を対象とした手法であり、実設計でよく用いられる複層せん断型粘弾性ダンパー(以下、複層ダンパー、Fig.1(b)参照)への適用方法は課題であった。そこで本論文では、複層ダンパーにおける放熱の影響を考慮できる一次元モデルを提案することにより、文献2)の解析手法の拡張を行う。そして、文献6)の長時間加振実験結果と解析値を比較し、その精度を検証する。

2 実験概要

本章では、文献6)の長時間加振実験の概説を行う。Fig.2に本実験で使用した複層ダンパーの詳細図・断面図および温度計測点を示す。本ダンパーは、長さ4024.5mm、層せん断面積 $A_s = 9.12 \times 10^5 \text{ mm}^2$ 、粘弾性体厚 $d_v = 8 \text{ mm}$ とした6層せん断型実大粘弾性ダンパーである。Fig.2のダンパーにTable1で示すランダム波および正弦波を入力して、長時間

加振実験を行った。ここで、 A_r : 振幅、 f_r : 振動数、 t_a : 載荷時間、 θ_a : 空気温度である。なお、入力するランダム波は高さ200m、幅・奥行50m、固有周期3秒、減衰定数 $h = 10\%$ の超高層建物の風応答をもとに作成された波であり、入力する正弦波は、置換正弦波法⁷⁾により、ランダム波をその特性を反映した正弦波に変換して作成された波である。本実験中、ダンパー温度を23か所で計測しているが、本論文ではFig.2(c)に示すB-B'断面のダンパー外側から2層目の粘弾性体の厚さ方向1/2(点2)、3層目の粘弾性体の厚さ方向1/2(点3)での計測結果を用いる。なお、B-B'断面は、粘弾性体の中心を通る断面である。

3 内部吸熱量の定義

文献2)の解析手法は、Fig.1(a)に示す2層ダンパーのように放熱を考慮する場所が、外板(Outer steel plate: 一番外側の鋼板)と中板(Inner steel plate: Center Lineにより分割された鋼板)の両端2か所で十分であるダンパーに適応され、その有用性が確認されているが、Fig.1(b)に示す複層ダンパーのように両端以外の鋼板からの放熱を考慮する必要がある場合には適応できない。そこで本論文では、任意の場所において熱伝達による放熱の影響を考慮するために、吸熱量 Q_N および内部吸熱量 \dot{Q}_N を導入する。

吸熱量 \dot{Q}_N と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)であり、内部吸熱量 \dot{Q}_N とは単位体積当たりの吸熱量である。本論文では、複層ダンパーの各鋼板の放熱量と等しいエネルギー量の内部吸熱量 \dot{Q}_N を各鋼板に与えることで放熱の影響を考慮する。本章では、Fig.3に示す直方体要素 m を例として、内部吸熱量 \dot{Q}_N について説明する。Fig.3(a)に内部発熱量

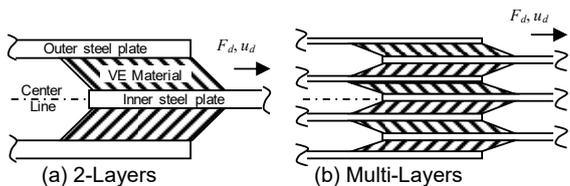


Fig.1 VE-Damper Type

Table 1 Damper deformation

Case	Random			Sinusoidal			θ_a [°C]
	σ_a [mm]	N_a	t_a [s]	A_r [mm]	f_r [mm]	t_a [s]	
A-3H-28	4.00	107	32400	5.66	0.142	30000	28
C-3H-24	4.00	108	32400	5.66	0.142	32400	24

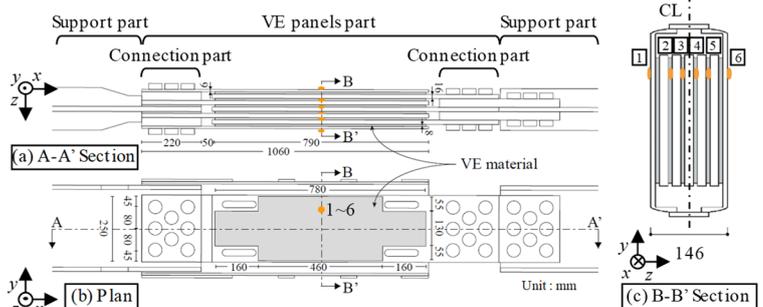


Fig.2 Full-scale VE damper specimen with the temperature measurement locations

Analysis methods of full-scale multi-layered viscoelastic dampers subjected to long-duration loading considering dynamic property change with the effect of heat transfer

OKUDA Shohei, SATO Daiki, OSABEL Dave

$\dot{Q}_{P,m}$ を持つ直方体要素 m の表面から熱伝達率 α_c によって空気への放熱が行われているときの状態を示す。また、Fig.3(b)に要素 m を一次元化したときの状態を示す。ここで、内部吸熱量 $\dot{Q}_{N,m}$ は熱伝達による空気への放熱量を要素 m の体積 $V_m (=A_c \times d_m)$ より除して定まる値であり、 A_c : 断面積、 d_m : 要素 m の厚さ、 θ_m : 節点 m の温度、 θ_a : 空気温度である。本論文では、一般的に単位時間当たりの空気への放熱量 Q が熱伝達率 α_c 、対称面温度 θ と空気温度 θ_a との温度差、表面積 S 、これら3つの積で求めることに倣い、吸熱量 Q_N を定める定数である等価熱伝達係数 α_{ceq} を用いて、 $Q_{N,m}$ および $\dot{Q}_{N,m} (=Q_{N,m}/V_m = Q_{N,m}/A_c d_m)$ をそれぞれ次式で表現する。ただし、本論文では要素 m の両側の節点温度 θ_m 、 θ_{m-1} の平均を要素全体の温度とし、吸熱量 $Q_{N,m}$ および内部吸熱量 $\dot{Q}_{N,m}$ を導出している。

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

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

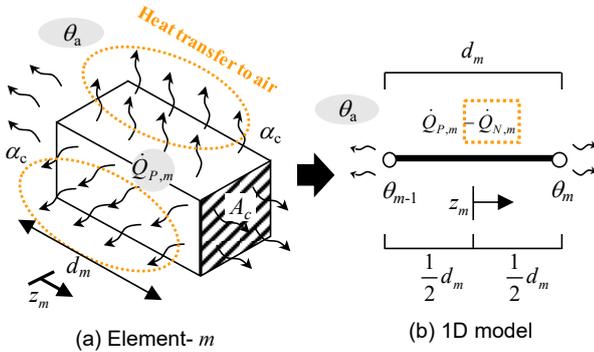


Fig. 3 Concept of negative internal heat generation

4 複層ダンパーの長時間応答時刻歴解析手法

本章では、3章で提案した内部吸熱量 \dot{Q}_N を用い、文献2)の手法を拡張した複層ダンパーの長時応答時刻歴解析手法を提案する。以下に、解析手法を説明する。

Fig.4(a)にFig.2の実大複層ダンパーのB-B'断面の模式図を示す。提案する解析手法において、Fig.4(a)の粘弾性ダンパーをFig.4(b)のように一次元化する。Fig.4(b)は、対称性を考えダンパーのB-B'断面の上半分を計17分割したときの図であり、 j : 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_{Ss} : 鋼板の開始節点番号、 j_{Se} : 鋼板の終了節点番号、 J : 全要素数、 m : 層番号、 m_V : 粘弾性体の層番号、 m_S : 鋼板の層番号、 M : 全層数、 M_V : 粘弾性体の層数、 M_S : 鋼板の層数である。このとき m_V 層目の粘弾性体 ($1 \leq m_V \leq M_V$) について、ステップ n における $u_{d,m_V}^{(n)}$ は適合条件より以下の式で表される。

$$u_{d,m_V}^{(n)} = u_d^{(n)} = \frac{1}{2} \sum_{j=j_{Vs,m_V}}^{j_{Ve,m_V}} \varsigma_j \gamma_j^{(n)} \quad (2)$$

ただし、 $\varsigma_{j_{Vs,m_V}} = d_{j_{Vs,m_V}+1}$ 、 $\varsigma_{j_{Ve,m_V}} = d_{j_{Ve,m_V}}$ 、 $j_{Vs,m_V} < j < j_{Ve,m_V}$ においては $\varsigma_j = d_j + d_{j+1}$ であり、 γ_j : 節点 j でのせん断歪である。各粘弾性体要素の節点 j ($j_{Vs,m_V} \leq j \leq j_{Ve,m_V}$) に分数

微分構成則を用い、数値積分を考えると下式が成立する²⁾。

$$\tau_{m_V}^{(n)} + \frac{a_j}{\Delta t^\alpha} \sum_{i=0}^N w^{(i)} \tau_{m_V}^{(n-i)} = G_j \left(\gamma_j^{(n)} + \frac{b_j}{\Delta t^\alpha} \sum_{i=0}^N w^{(i)} \gamma_j^{(n-i)} \right) \quad (3)$$

ここで、 τ_{m_V} : 粘弾性体のせん断応力、 α : 分数微分の次数、そして G_j 、 a_j 、 b_j は構成則のパラメータであり、それぞれ次式から求められる^{4),5)}。

$$a_j = a_{ref} \lambda_j^\alpha, \quad b_j = b_{ref} \lambda_j^\alpha \lambda_{1,j}, \quad G_j = G_{ref} \lambda_{2,j} \quad (4a,b,c)$$

G_{ref} 、 a_{ref} 、 b_{ref} は基準温度 θ_{ref} における G 、 a 、 b の材料値であり、粘弾性体要素に依らず一定である。また λ は温度依存性を考慮するシフトファクターであり、 $\lambda_{1,j}$ 、 $\lambda_{2,j}$ は大歪による軟化現象を考慮するための係数でそれぞれ次式より求められる。

$$\lambda_j = \exp \left[-p_1 (\theta_j^{(n)} - \theta_{ref}) / (p_2 + \theta_j^{(n)} - \theta_{ref}) \right] \quad (5a)$$

$$\lambda_{1,j} = 1 + C_{1,j} (\gamma_{max,j} - 1), \quad \lambda_{2,j} = 1 + C_{2,j} (\gamma_{max,j} - 1) \quad (5b,c)$$

ここで θ_j は節点 j の温度を表す。また、 γ_{max} : 経験最大歪であり、 C_1 、 C_2 は、 $\theta_j < 20$ °C、 $100\% \leq \gamma_{max} \leq 300\%$ の範囲で $C_1 = 0.124$ 、 $C_2 = -0.182$ であり、それ以外で $C_1 = C_2 = 0$ とした。また、本論文ではこれに加え、時間経過に伴う剛性の回復現象⁸⁾も考慮し、100%以上の粘弾性体要素の歪経験から0.09s経つと粘弾性体要素が経験した最大歪 γ_{max} を0とする解析モデルを用いた。式(3)において、 Δt は解析の刻み時間であり、 w は解析前に予め計算される重み係数である⁴⁾。 N : 数値積分点の数であり、载荷初期で n が未だ N に達しない場合は、 N を n と置く⁴⁾。式(3)、(4)より、各粘弾性体層において $\tau_{m_V}^{(n)}$ が厚さ方向にそれぞれ一定であることに注意し整理すると、最終的に各粘弾性体の応力 $\tau_{m_V}^{(n)}$ 、せん断歪 $\gamma_j^{(n)}$ はそれぞれ以下の式で求められる。

$$\tau_{m_V}^{(n)} = \left\{ 2u_d^{(n)} - \sum_{j=j_{Vs,m_V}}^{j_{Ve,m_V}} \frac{\varsigma_j (\tilde{A}_j - \tilde{B}_j)}{G_j (\Delta t^\alpha + b_j w^{(0)})} \right\} / \sum_{j=j_{Vs,m_V}}^{j_{Ve,m_V}} \frac{\varsigma_j (\Delta t^\alpha + a_j w^{(0)})}{G_j (\Delta t^\alpha + b_j w^{(0)})} \quad (6)$$

$$\gamma_j^{(n)} = \frac{\tau_{m_V}^{(n)} (\Delta t^\alpha + a_j w^{(0)}) + \tilde{A}_j - \tilde{B}_j}{G_j (\Delta t^\alpha + b_j w^{(0)})} \quad (7)$$

ここで、 \tilde{A}_j 、 \tilde{B}_j は下式で求められる。

$$\tilde{A}_j = a_j \sum_{i=1}^N w^{(i)} \tau_{m_V}^{(n-i)}, \quad \tilde{B}_j = G_j b_j \sum_{i=1}^N w^{(i)} \gamma_j^{(n-i)} \quad (8a,b)$$

ダンパー力 $F_d^{(n)}$ は、式(6)より得られた各層の応力 $\tau_{m_V}^{(n)}$ の平均にダンパーの総せん断面積 A_s を乗じることにより下式から算出される。

$$F_d^{(n)} = \left(\sum_{m_V=1}^{M_V} \tau_{m_V}^{(n)} / M_V \right) A_s \quad (9)$$

次に温度上昇幅 $\Delta \theta_j^{(n)}$ について考える。各粘弾性体層 ($1 \leq m_V \leq M_V$) の各要素 ($j_{Vs,m_V} + 1 \leq j \leq j_{Ve,m_V}$) の発熱エネルギー密度の増分 $\Delta \dot{Q}_{P,j}$ は下式より得られる²⁾。ただしそれ以外の要素については $\Delta \dot{Q}_{P,j} = 0$ である。

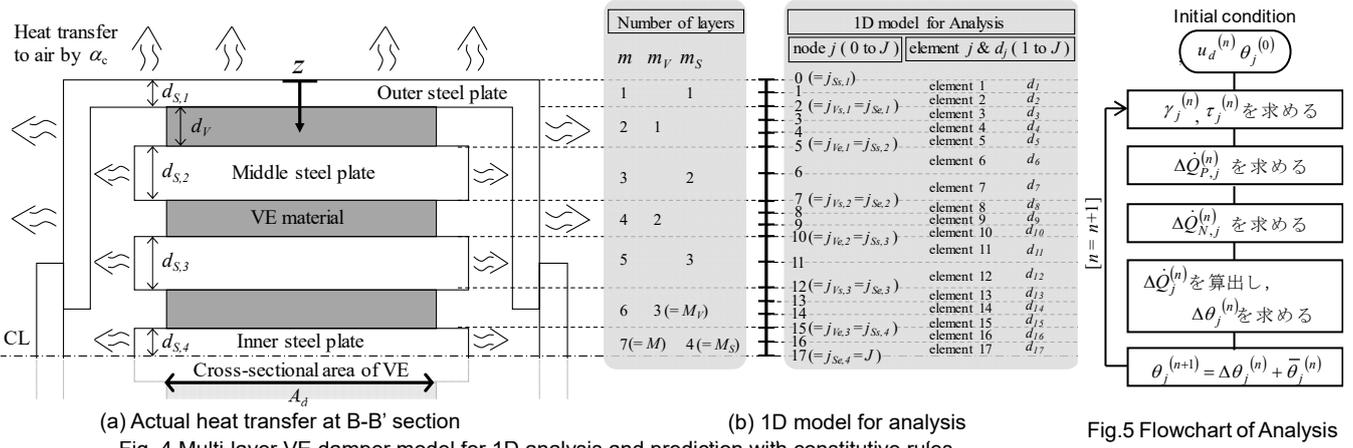


Fig. 4 Multi-layer VE damper model for 1D analysis and prediction with constitutive rules

Fig.5 Flowchart of Analysis

$$\Delta \dot{Q}_{P,j} = (\tau_{m_r}^{(n)} + \tau_{m_r}^{(n-1)}) (\gamma_j^{(n)} - \gamma_{j-1}^{(n-1)} + \gamma_j^{(n)} - \gamma_j^{(n-1)}) / 4 \quad (10)$$

一方で、熱伝達による空気への放熱量を考慮するため、下式より各鋼板 ($1 \leq m_s \leq M_s$) の各要素 ($j_{Ss,m_s} + 1 \leq j \leq j_{Se,m_s}$) において内部吸熱量 \dot{Q}_N を考え、吸熱エネルギー密度の増分 $\Delta \dot{Q}_{N,j}$ を以下の式により求める。ただし、それ以外の要素については $\Delta \dot{Q}_{N,j} = 0$ である。

$$\Delta \dot{Q}_{N,j} = \dot{Q}_{N,j} \Delta t = \alpha_{ceq,m_s} \left(\frac{\theta_j + \theta_{j+1}}{2} - \theta_a \right) \Delta t / d_{S,m_s} \quad (11)$$

なお、ここで $\dot{Q}_{N,j}$ は式(1b)における θ_m 、 θ_{m-1} を θ_j 、 θ_{j-1} とし、また $\alpha_{ceq,m}$ を α_{ceq,m_s} (m_s 層番目の等価熱伝達係数) に、 d_m を d_{S,m_s} (m_s 層番目の鋼板層厚) に置き換えた式である。そして、要素 j の吸収エネルギー密度の増分 $\Delta \dot{Q}_j$ を次式から求める。

$$\Delta \dot{Q}_j = \Delta \dot{Q}_{P,j} - \Delta \dot{Q}_{N,j} \quad (12)$$

節点 j での温度上昇幅 $\Delta \theta_j^{(n)}$ は、節点 j に接する両端要素の吸収エネルギー密度の増分 $\Delta \dot{Q}_j$ をそれぞれの比熱と密度で除し、それらの半分の和として以下の式で得られる²⁾。ただし、両端の節点の $\Delta \theta_j^{(n)}$ では片側しか要素が存在しないため式(13b,c)で算出される。

$$\Delta \theta_j^{(n)} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \dot{Q}_j}{s_j \rho_j} + \frac{\Delta \dot{Q}_{j+1}}{s_{j+1} \rho_{j+1}} \right) \quad (0 < j < J) \quad (13a)$$

$$\Delta \theta_0^{(n)} = \Delta \dot{Q}_j / (2s_j \rho_j), \quad \Delta \theta_J^{(n)} = \Delta \dot{Q}_j / (2s_J \rho_J) \quad (13b,c)$$

また、 Δt 秒間において、上述の温度上昇と同時に、熱伝導・伝達による温度変化も評価する。つまり、次ステップ $n+1$ での温度 $\theta_j^{(n)}$ は現ステップ n の発熱・吸熱エネルギーによる温度変化 $\Delta \theta_j^{(n)}$ と、熱伝導・伝達による温度上昇または下降 ($\bar{\theta}_j^{(n)}$) の影響を合わせて、次式より得られる。

$$\theta_j^{(n+1)} = \Delta \theta_j^{(n)} + \bar{\theta}_j^{(n)}, \quad \bar{\theta}_j^{(n)} = \sum_{k=0}^K x_{jk} \theta_k^{(n)} + y_j \quad (14a,b)$$

式(14b)は温度 $\theta_j^{(n)}$ の時の一次元非定常熱伝導方程式の解法を略したものであり、 $\bar{\theta}_j^{(n)}$ は一次元非定常熱伝導方程式の解である²⁾。以上より、Fig.5 のようにしてダンパーの応力歪・温度分布を時系列で求めることができる。

5 実験結果と解析値の比較

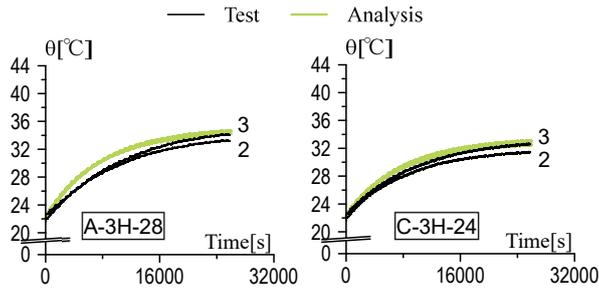
本章では、文献 6) の長時間加振実験結果と解析値を比較し、その精度を確認する。解析において使用したパラメータは、 $\alpha = 0.588$ 、 $G_{ref} = 0.0392 \text{ N/mm}$ 、 $a_{ref} = 5.6 \times 10^{-5}$ 、 $b_{ref} = 2.10$ 、 $p_1 = 14.06$ 、 $p_2 = 97.32$ 、 $\theta_{ref} = 20^\circ\text{C}$ 、 $\Delta t = 0.01 \text{ s}$ 、 $T_w = 15 \text{ s}$ であり、初期温度 $\theta_j^{(0)}$ は全ての節点で 22°C とした。その他の材料パラメータ、各鋼板の等価熱伝達係数 α_{ceq} の値、各層の要素数は Table 2 にまとめて示す。Fig.6 に各ケースの風応答波および置換正弦波による長時間加振実験の温度計測点 2, 3 (Fig.2) における温度の実験結果と解析値を合わせて示す。また、Fig.7 に各ケースの加振実験における貯蔵剛性 K'_d と粘性係数 C_d の時間変化と解析値を合わせて示す。なお、 K'_d と C_d は文献 9) で示された方法より算出している。Fig.6 より、提案した解析手法により、入力波の種類・周辺温度に依らず、ダンパーの温度をどの位置においても精度よく再現できていることが分かる。また、Fig.7 より、貯蔵剛性 K'_d および粘性係数 C_d の変化についても精度よく再現できていることが確認できる。Fig.8 に各ケースの加振時間 0 ~ 400 秒, 9800 ~ 10200 秒, 24800 ~ 25200 秒におけるダンパーの履歴曲線の実験結果と解析値を合わせて示す。Fig.8 より、すべてのケースの任意の時刻において、提案した解析手法により精度よくダンパーの履歴を再現できていることが確認できる。

Table 2 Analysis parameter

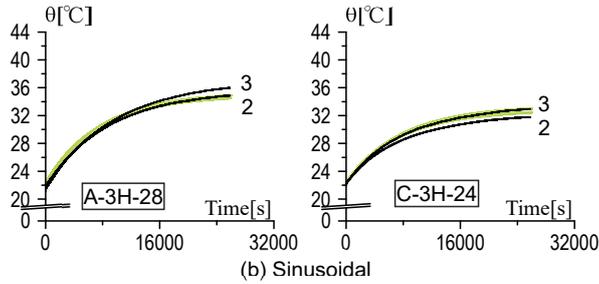
Damper layer	Material	d [mm]	Number of elements	κ [N/s ² C]	s [Nmm/kg ² C]	ρ [kg/mm ³]	α_{ceq} [N/s/m ² C]	
							A-3H-28	C-3H-24
1st	Steel	9	12	43.128	46.63×10^4	7.8×10^{-6}	10.60	10.55
2nd	VE	8	12	0.188	18.70×10^5	1.0×10^{-6}		
3rd	Steel	16	24	43.128	46.63×10^4	7.8×10^{-6}	5.13	4.48
4th	VE	8	12	0.188	18.70×10^5	1.0×10^{-6}		
5th	Steel	16	24	43.128	46.63×10^4	7.8×10^{-6}	4.35	3.58
6th	VE	8	12	0.188	18.70×10^5	1.0×10^{-6}		
7th	Steel	8	12	43.128	46.63×10^4	7.8×10^{-6}	2.67	2.11

6 おわりに

文献 2) で提案されていた 2 層ダンパーの解析手法を内部吸熱量の導入により拡張し、長時間加振時における複層ダンパーの熱伝導・伝達による動的特性変化を考慮した解析

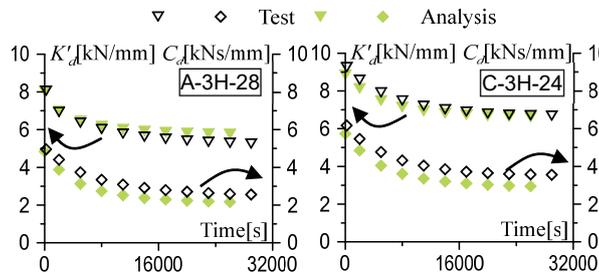


(a) Random

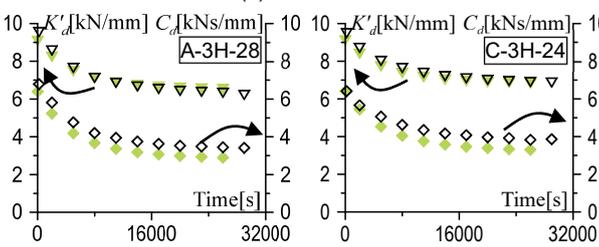


(b) Sinusoidal

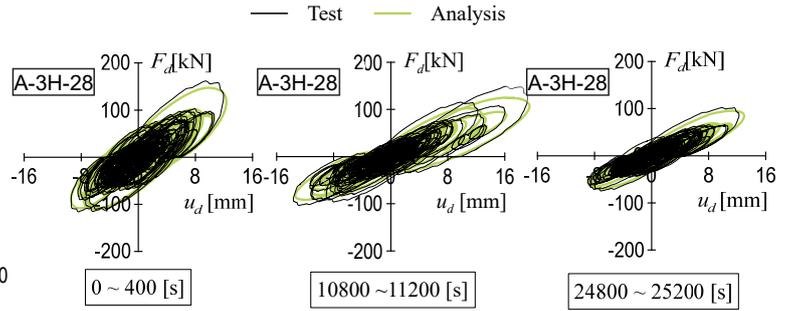
Fig. 6 Tests vs. analysis : Temperature time history



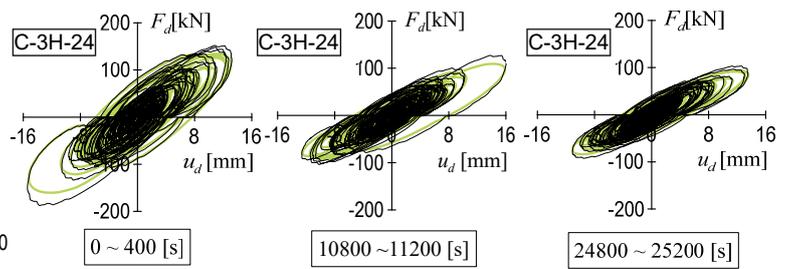
(a) Random



(b) Sinusoidal

Fig. 7 Tests vs. analysis : K'_d and C_d histories

(a) Random



(b) Sinusoidal

Fig. 8 Tests vs. analysis : $u_d - F_d$ loops

手法を提案した. そして文献 6) の長時間加振実験結果と比較することでその精度を確認した. その結果, 提案した解析手法によりダンパーの各位置の温度, 動的特性値, 履歴曲線の変化を時系列で高精度に再現できることを確認した.

参考文献

- 1) 日本免震構造協会: パンク制振構造 設計・施工マニュアル 第3版, 2013.11
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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, 第543号, pp.77-86, 2001.5

- 5) 笠井和彦, 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2 温度上昇および歪・歪速度がもたらす非線形性のモデル化), 日本建築学会構造系論文集, 第561号, pp.55-63, 2002.11
- 6) 杉山暢方, 笠井和彦, 佐藤大樹, 松田和浩: 長時間の風外力における実大粘弾性ダンパーの特性評価実験, その1, その2, 日本建築学会関東支部研究報告集, 第85号, pp.261-268, 2015.3
- 7) 佐藤大樹, 笠井和彦: 長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパーの特性および正弦波による評価手法, 構造工学論文集, 第53B号, pp.67-74, 2007.3
- 8) 境原直樹, 後藤直哉, 笠井和彦, 竹内徹, 緑川光正: エネルギー吸収部材をもつロッキング架構の応答解析-その1 (E-ディフェンス鋼構造物実験研究 その94), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1337-1338, 2013.8
- 9) 大木洋司, 笠井和彦, 高橋治: 微小振幅における速度依存型ダンパーの性能について, 構造工学論文集, 第50B巻, pp.601-609, 2004.3

*1 学生会員 東京工業大学 大学院生

*2 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授・博士 (工学)

*3 学生会員 東京工業大学 博士課程

Grad. Student, Tokyo Institute of Technology
Assoc. Prof., First, Tokyo Institute of Technology
Dr. Student, Tokyo Institute of Technology