T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	熱伝導・伝達の影響を考慮した複層粘弾性ダンパーの簡易一次元モデル化手法
Title(English)	Simplified One-Dimensional Modeling Method for Multi-Layered Viscoelastic Dampers Considering Heat Conduction and Transfer
著者(和文)	梁其峻, 佐藤大樹, OSABEL DAVE M
Authors(English)	Qijun Liang, Daiki Sato, Dave M Osabel
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, , pp. 547-548
Citation(English)	, 構造II, , pp. 547-548
発行日 / Pub. date	2025, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

熱伝導・伝達の影響を考慮した複層粘弾性ダンパーの簡易一次元モデル化手法

正会員 ○梁 其峻*[1]
同 佐藤大樹*[2] 同 OSABEL Dave M.*[3]

熱伝導・伝達 一次元モデル
実大複層粘弾性ダンパー 時刻歴解析

1 はじめに

粘弾性（VE）ダンパーは、地震による振動だけでなく風荷重による構造振動からもエネルギーを効果的に吸収できるため、高層建築物の有効な制振部材の一つである。VE 材料は外乱から与えられたせん断変形に対し反力を生じ、振動エネルギーを熱へ交換して吸収する。そのため、温度が著しく上昇する可能性がある。また、VE 材料の動的特性の貯蔵剛性 K'_d および粘性係数 C_d は、Fig. 1 に示すようにそれぞれの変位 u_d - 反力 F_d の履歴曲線の傾き、速度 $\dot{u}_d$ - 反力 F_d の履歴曲線の傾きによって評価される。

温度が上昇したり、歪レベルが高くなったり、貯蔵剛性 K'_d および粘性係数 C_d の両方が低下する。この VE ダンパーの特性変化は、様々な 1 次元時刻歴手法を通じて広範に研究されてきた[1-4]。しかし、これらの方法は詳細な要素分割と複雑な計算を伴うため、実用的な構造解析において大きな計算コストを生じさせる。さらに、VE ダンパーの熱伝導・伝達特性を考慮するためには、適切な熱伝導係数 α_c を設定する必要があるが、これには試行錯誤的な手法が必要となる。既往研究の詳細モデル[1-4]で試行錯誤を行うと、膨大な計算時間を要することになる。

そこで本研究では、複層 VE ダンパーを解析するための高い計算効率を持つ簡易的な 1 次元モデル化手法を提案する。提案するモデル化手法は、VE ダンパーの挙動における温度、振動数、および歪レベルの依存性を考慮した 1 次元時刻歴手法[4]に組み込まれる。また、この手法により、熱伝導・伝達の影響を考慮するための試行錯誤が大幅に効率化され、適切な熱伝導係数 α_c の決定にかかる計算時間を削減することができる。

提案するモデル化手法に基づき、本研究では 6 層 VE ダンパーに対する風荷重による加振試験[5]を再現するための 1 次元時刻歴解析を行い、このモデル化手法の精度と有効性を検証することを目的とする。

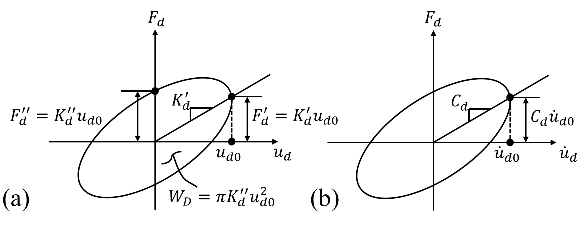


Fig. 1. (a) $F_d - u_d$ and (b) $F_d - \dot{u}_d$ hysteresis curves.

2 ダンパー加振実験[5]

本節では、佐藤らの研究[5]による VE ダンパーの加振実験の概説を行う。

Fig. 2 は加振実験で使用された 6 層 VE ダンパーを示している。このダンパーは XY 平面および XZ 平面において対称である。ダンパーの寸法は長さ l = 4024.5 mm、VE 材料 1 層の厚さ d_v = 8 mm、総せん断面積 A_s = 9120 cm^2 である。このダンパーには 3M 製 ISD111 型 VE 材料が使用されており、その詳細な特性については文献 1 を参照されたい。

Fig. 3 は風荷重によるダンパー変位の時刻歴を示す。文献 5 では、高さ 200m・幅奥行き 50m の超高層建物に対して、再現期間 500 年・粗度区分 III の条件下で風方向および風直角方向の風力時刻歴波形を AR 法により作成した。これらの風力波形を用いて、固有周期 T_0 = 3 秒、減衰定数 2%の 1 質点モデルに対する時刻歴応答解析を行い、得られた変形時刻歴を標準偏差 σ_u = 4.0 mm で基準化し、ダンパー変形波形として使用した。これは、建物の階高を 4 m、ダンパーをブレース型配置とした場合、0.5%程度の建物の層間変形角におけるダンパー変形 (約 16 mm) を想定したものである。

また、本研究では、Fig. 3 に示す風方向における 750 秒のダンパー変位を 1 区間として、これを繰り返し載荷し、総加振時間が 6000 秒の試験結果を使用している。

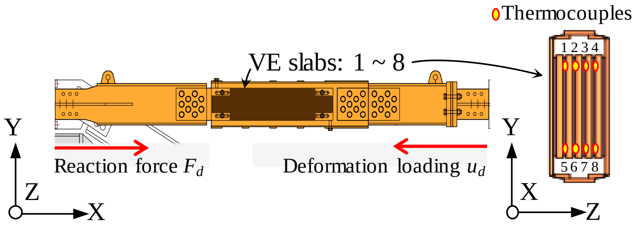


Fig. 2. VE damper specimen and location of thermocouples.

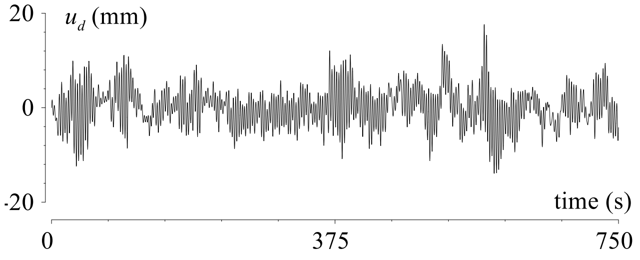


Fig. 3. Damper deformation time-histories in along-wind direction.

Simplified One-Dimensional Modeling Method for Multi-Layered Viscoelastic Dampers Considering Heat Conduction and Transfer

LIANG Qijun,
SATO Daiki, OSABEL Dave Montellano

3　簡易一次元モデル化手法

本節では、複層 VE ダンパーのための簡易モデル化手法を提案する。実際の VE 層数でモデル化し、各層を 12 要素に分割した詳細なモデル[4]を用いた解析結果によれば、多層ダンパーの内部温度分布は各 VE 材料層間で非常に類似していることが確認された。この結果に基づき、本研究では Fig. 4 に示す簡易モデル化手法を提案する。

この手法では、複数層の VE 材料を単一層の VE 材料でモデル化し 1 次元時刻歴解析[4]を行う。ダンパー歪が均一と考えた上 ($\gamma_d^{(n)} = u_d^{(n)}/d_v$)、VE 層の応力$\tau^{(n)}$は時刻歴の各ステップ n に次式で得られる。

$$\tau^{(n)} = \frac{G^{(n)}\gamma_d^{(n)}[(\Delta t)^\alpha + b^{(n)}w^{(0)}]}{[(\Delta t)^\alpha + a^{(n)}w^{(0)}]} + \frac{G^{(n)}b^{(n)}\sum_{i=1}^{N} w^{(i)}\gamma_d^{(n-i)}}{[(\Delta t)^\alpha + a^{(n)}w^{(0)}]} - \frac{a^{(n)}\sum_{i=1}^{N} w^{(i)}\tau^{(n-i)}}{[(\Delta t)^\alpha + a^{(n)}w^{(0)}]} \quad (1)$$

ここで、$w=$ 文献 6 に基づいた重み係数、$N=$ 数値積分点の数、$a^{(n)}$, $b^{(n)}$, $G^{(n)}$ = 分数微分構成則[6, 7]で提出された振動数・温度・歪レベル依存性を表すパラメータである。比較として、文献 4 の詳細なモデルでは各層の VE 要素に$\tau^{(n)}$を別々に計算するため、計算コストが大きくなる。

ダンパー反力$F_d^{(n)}$は、式(1)より得た$\tau^{(n)}$に総せん断面積A_sを乗じることで得られる。

$$F_d^{(n)} = A_s\tau^{(n)} \quad (2)$$

解析は実験結果においてダンパー温度が環境温度の 30°Cと一致した (3778 秒) 後から行った。簡易モデル化手法を用いて 1 次元時刻歴解析[4]により風方向加振を再現した結果、解析時間は文献 4 の詳細なモデル手法の 20%であった。Fig. 5a は簡易モデルによる温度結果 (熱伝導係数 α_c = 0 ~ 0.5 N/s/cm/°C) と実験結果を合わせて示している。試行錯誤により、α_c = 0.2 N/s/cm/°Cのとき解析結果の温度が実験結果に最も近いことが確認されたため、この値を用いることとした。Fig. 5b では、3800～4200 秒および 4800～5200 秒の $F_d - u_d$ 履歴曲線を示して、α_c = 0.2 N/s/cm/°Cを用いる解析結果が実験結果をよく再現していることが確認できる。また、Table 1 から各値の α_c で得られた K'_d 比(＝解析値/実験値)の違いはそれほど大きくないことがわかる。これは、実験結果との比較がない条件下でも、α_c = 0 を用いる解析が良好な精度を持つことを示している。

4　おわりに

本研究では、複層 VE ダンパーのための簡易モデル化手法を提案した。詳細なモデル[4]と比較し、計算時間を約 80%削減している。さらに、提案モデルは熱伝導・伝達の影響を考慮し、風荷重による外乱でのダンパー応答に関する実験結果を精度よく再現していることが確認した。

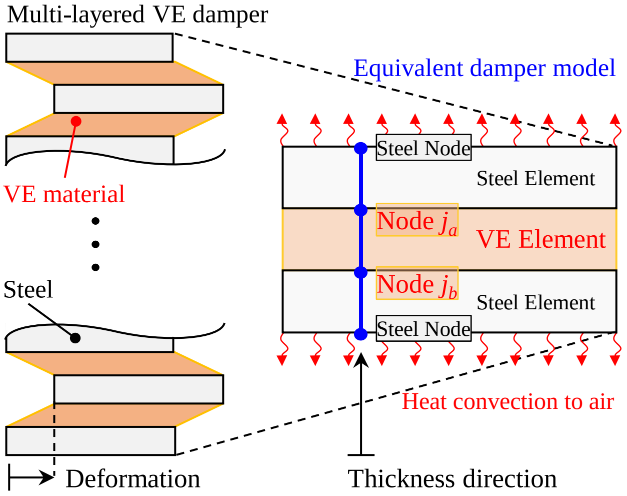
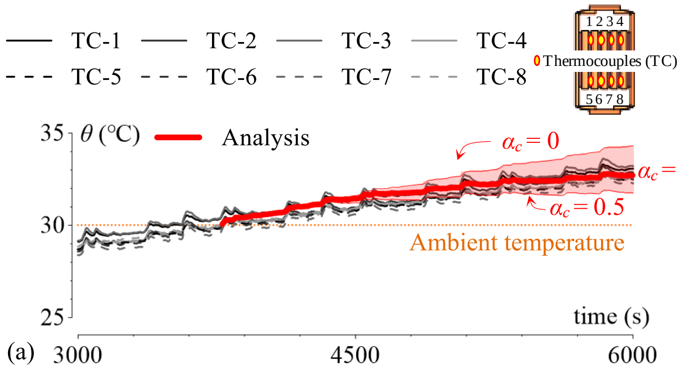


Fig. 4. The equivalent model of multi-layered VE dampers.



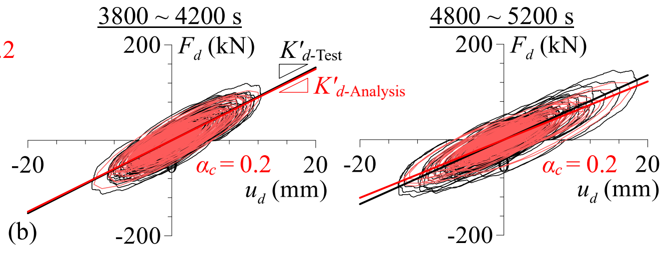


Fig. 5. (a) Temperature time-history results and (b) F_d - u_d hysteresis curves during 3800 ~ 4200 s and 4800 ~ 5200 s.

参考文献

1)　笠井和彦，他 2 名：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，pp.61-69，2006.1
2)　Osabel DM et al. Evaluation Method for Viscoelastic Damper subjected to Long-Duration Wind Loading by Equivalent Sinusoidal Waves, National Symposium on Wind Engineering Proceedings, Vol.26 (2020), Pages 102-107.
3)　Kasai K et al. Dynamic response characterization and simplified analysis methods for viscoelastic dampers considering heat transfer. Earthquake Engng Struct Dyn. 2023; 52: 27–50.
4)　Sato D et al. Three-Dimensional Finite Element Analysis and Simplified One-Dimensional Analysis Methods for Full-Scale Viscoelastic Damper Considering Strain Sensitivity. Earthquake Engng Struct Dyn. 2024; 0098-8847.
5)　杉山暢方，他 3 名：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 風応答によるダンパーの内部温度の検討，日本建築学会関東支部研究報告集，第 85 号，pp.261-264, 2015.3
6)　笠井和彦，他 3 名：粘弾性体の温度・振動数・振幅依存性を考慮した構成測（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
7)　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

Table 1. K'_d ratio between analysis and test in the loading duration

Time range (s)	3800 ~ 4200			4800 ~ 5200			5800 ~ 6000		
α_c (N/s/cm/°C)	0	0.2	0.5	0	0.2	0.5	0	0.2	0.5
$K'_{d\text{-Analysis}}$ / $K'_{d\text{-Test}}$	0.98	0.98	0.98	0.89	0.90	0.91	0.88	0.92	0.94

*1　東京科学大学　大学院生
*2　東京科学大学　准教授・博士（工学）
*3　チョンナム大学　韓国　博士研究員

* Graduate Student, Institute of Science Tokyo *1
* Associate Professor, IIR, Institute of Science Tokyo, Dr. Eng.*2
* Postdoctoral Researcher, Chonnam National University, South Korea, Ph.D