

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	大歪依存性を考慮した実大複層粘弾性ダンパーの三次元有限要素解析手法
Title(English)	Three-dimensional Finite Element Method for Full-scale Multilayer Viscoelastic Damper Considering Strain Sensitivity
著者(和文)	梁其峻, 佐藤大樹, OSABEL Dave M.
Authors(English)	LIANG Qijun, SATO Daiki, OSABEL Dave Montellano
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 425-428
Citation(English)	, , , pp. 425-428
発行日 / Pub. date	2024, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

大歪依存性を考慮した実大複層粘弾性ダンパーの三次元有限要素解析手法

構造—振動

正会員 ○ 梁 其峻^{*1} 同 佐藤 大樹^{*2}
同 OSABEL Dave M.^{*3}

温度・振動数・大歪依存性

熱伝導

実大複層粘弾性ダンパー

三次元モデル

有限要素解析

1 はじめに

1.1 粘弾性ダンパー

地震および風の外乱に受ける建物の制振を目的とした有効な部材の一つである粘弾性ダンパーは、小から大の外乱まで使用範囲が広く、効果的に振動エネルギーを吸収できる。粘弾性体は外乱から与えられたせん断変形に対し反力を生じ、仕事を熱エネルギーへ交換して吸収する。そ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反力 F_d - 変位 u_d の履歴曲線の傾き、反力 F_d - 速度 $\dot{u}_d$ の履歴曲線の傾きによって評価される。

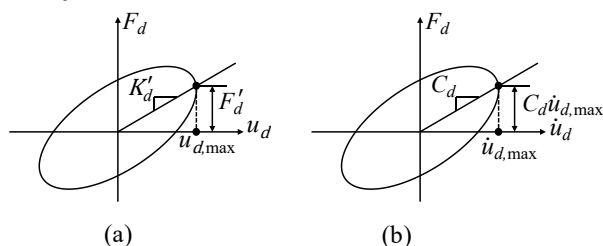


Figure 1. (a) Force – deformation ($F_d - u_d$) and (b) force–velocity ($F_d - \dot{u}_d$) hysteresis curves

1.2 研究背景

粘弾性体の動的特性が温度および振動数に依存することは、履歴曲線の形状が振動数による決まって、傾きが温度上昇とともに低下するという線形挙動が得られる。一方、大振幅や大歪の場合では、温度・振動数によって決まる履歴曲線の形状について、傾きが歪の増加に伴い 1 サイクル目から低下し、時間とともにさらに低下して行く非線形挙動が得られる。以上の線形・非線形挙動に対し、笠井らではそれぞれの線形領域における温度・振動数依存の分数微分構成則¹⁾および大歪がもたらす非線形の分数微分構成則²⁾が提案した。

また、粘弾性ダンパーの動的特性の評価のための解析手法では、ダンパーの複雑な形状にも対応できる汎用 3 次元有限要素解析に対する研究はこれまで数多く行っている。文献 3) では線形の分数微分構成則と 3 次元有限要素解析を組み合わせることにより、小規模の 2 層粘弾性ダンパー（総せん断面積 = 3,817 mm²）の動的特性を高精度に再現できる解析手法（Linear 3D-FE method、以降、線形

3 次元解析法と呼ぶ）が提案された。それに、筆者ら⁴⁾では非線形構成則と以上の線形 3 次元解析法を組み合わせることで、大歪依存性を再現できる解析手法（Nonlinear 3D-FE method、以降、非線形 3 次元解析法と呼ぶ）が提案された。

しかし、それらの研究は、実験的・解析的扱いが簡単な小規模の 2 層粘弾性ダンパーを対象としたものが多く、実際に設計でよく用いられる実大複層粘弾性ダンパーを対象とした研究は極めて少ないのが現状である。奥田ら⁵⁾が線形 3 次元解析法を用いて、粘弾性体（せん断面積 = 25,600 mm²）が 2 層から 16 層までのダンパーモデルを解析的に検討した。その結果、層数の増加に伴い、粘弾性体の内部温度分布が平均的に上昇し、動的特性値がより低くなることが確認した。そのため、大歪依存性を考慮した実大複層粘弾性ダンパーへの適用方法は課題であった。

1.3 本報の目的と概要

本研究では、文献 4) で提案された非線形 3 次元解析法により、文献 6) で示された実大 8 層粘弾性ダンパーを対象として拡張し、複層ダンパーにおいて、大歪に伴う性能の変化の影響を把握するために解析的検討を行う。解析値が実験結果および線形 3 次元解析法の解析値を比較することでその実大複層粘弾性ダンパーへの妥当性を確認する。以下に、本報の構成を示す。

2 章では文献 4) で提案された非線形 3 次元解析法について概説する。3 章では文献 6) で示された実大 8 層粘弾性ダンパーの大振幅加振実験を説明し、モデル化して、解析概要を説明する。4 章では非線形 3 次元解析法で得られた解析値が実験結果および線形 3 次元解析法の解析値を比較するにより、その実大複層粘弾性ダンパーへの妥当性を検討する。

2 複層粘弾性ダンパーの有限要素解析法

2.1 三次元有限要素解析手法における線形構成則

本研究で用いる非線形 3 次元解析法は文献 3) で提案された線形 3 次元解析法と非線形構成則を組み合わせ得られた大歪依存性を再現する解析手法である。まず、3 次元の弾性要素 j における計算点 k での温度・振動数依存性を考慮するため、せん断貯蔵剛性 G'_{jk} と損失係数 η_{jk} は、

笠井らの式を用いて以下のように定義する³⁾。

$$G'_{jk} = G \frac{1 + a_{jk} b_{jk} \omega^{2\alpha} + (a_{jk} + b_{jk}) \omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)}{1 + a_{jk}^2 \omega^{2\alpha} + 2a_{jk} \omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (1)$$

$$\eta_{jk} = \frac{(-a_{jk} + b_{jk}) \omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)}{1 + a_{jk} b_{jk} \omega^{2\alpha} + (a_{jk} + b_{jk}) \omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (2)$$

ここで分数微分の次数 α 、また G 、 a_{jk} 、 b_{jk} は構成則のパラメータであり、特に a_{jk} 、 b_{jk} は温度に依存し次式で求まる。

$$a_{jk} = a_{ref} \lambda_{0,jk}^\alpha, \quad b_{jk} = b_{ref} \lambda_{0,jk}^\alpha \quad (3a, b)$$

なお a_{ref} 、 b_{ref} は基準温度 θ_{ref} (20℃) における a_{jk} 、 b_{jk} の材料値であり、要素に依らず一定である。また $\lambda_{0,jk}$ 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。2パラメーター p_1 、 p_2 は温度依存の程度を表す。

$$\lambda_{0,jk} = \exp[-p_1(\theta_{jk} - \theta_{ref}) / (p_2 + \theta_{jk} - \theta_{ref})] \quad (4)$$

2.2 非線形 3 次元解析法

また、粘弾性ダンパーの大歪がもたらす非線形挙動を再現するため、文献 2) で様々な温度・振動数・振幅で実験を行った結果により提出されたシフトファクター $\lambda_{1,jk}$ および $\lambda_{2,jk}$ を用いて、式(1)と式(3b)を以下のように更新する。

$$G'_{jk} = G \lambda_{2,jk} \frac{1 + a_{jk} b_{jk} \omega^{2\alpha} + (a_{jk} + b_{jk}) \omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)}{1 + a_{jk}^2 \omega^{2\alpha} + 2a_{jk} \omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (5)$$

$$b_{jk} = b_{ref} \lambda_{0,jk}^\alpha \lambda_{1,jk} \quad (6)$$

ここで $\lambda_{1,jk}$ および $\lambda_{2,jk}$ は 3 次元の弾性要素 j における計算点 k での最大歪 $\gamma_{\max,jk}$ (絶対値)から求める。ただし、 $\gamma_{\max,jk}$ は、当サイクルの歪 γ_{jk} によって更新・非更新されている。

$$\lambda_{1,jk} = 1 + C_1(\gamma_{\max,jk} - 1) \geq 1, \quad \lambda_{2,jk} = 1 + C_2(\gamma_{\max,jk} - 1) \leq 1 \quad (7a, b)$$

式(7)の不等号は、 $\lambda_{1,jk}$ 、 $\lambda_{2,jk}$ それぞれの下限值と上限値を示している。

Fig. 2 に非線形 3 次元解析法のフローチャートを示す。はじめに、サイクル数 $n = 0$ の時、ダンパー各要素 j の計算点 k における初期温度が $\theta_{jk}^{(n=0)}$ 与えられている。これらと式(1)、(2)から各計算点 k の $G'_{jk}^{(n)}$ と $\eta_{jk}^{(n)}$ を算定する。

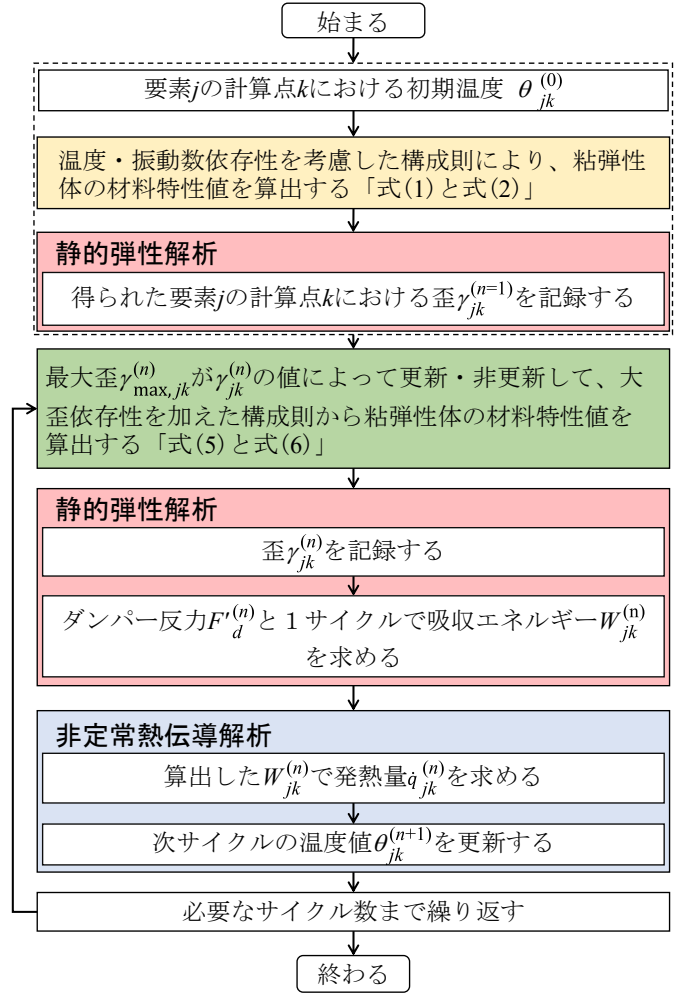


Figure 2. Flowchart of nonlinear 3D-FE method

ここで、最初のサイクルでは、温度・振動数依存性だけ考慮している。その後、各要素は弾性要素として、最大変形 $u_{d\max}^{(n)}$ を与える静的弾性解析を行い、それに対しての歪 $\gamma_{jk}^{(n)}$ が得られる。次に、これらの $\gamma_{jk}^{(n)}$ を用い、最大歪 $\gamma_{\max,jk}^{(n)}$ を更新・非更新して、非線形構成則の式(5)、(6)により大歪依存性を考慮した $G'_{jk}^{(n)}$ と $\eta_{jk}^{(n)}$ が算定される。

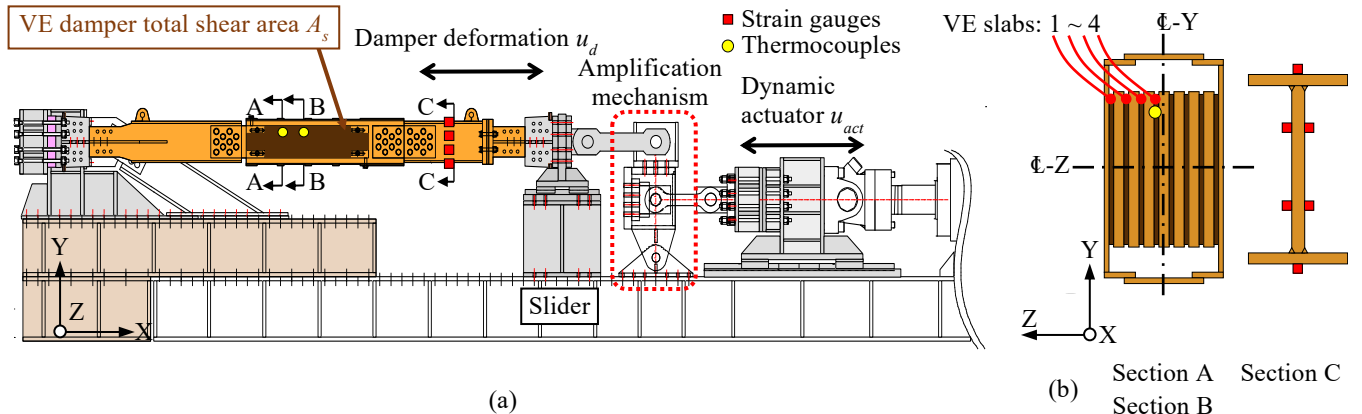


Figure 3. (a) Test setup of the full-scale eight-layered VE damper and (b) locations of strain gauges and thermocouples

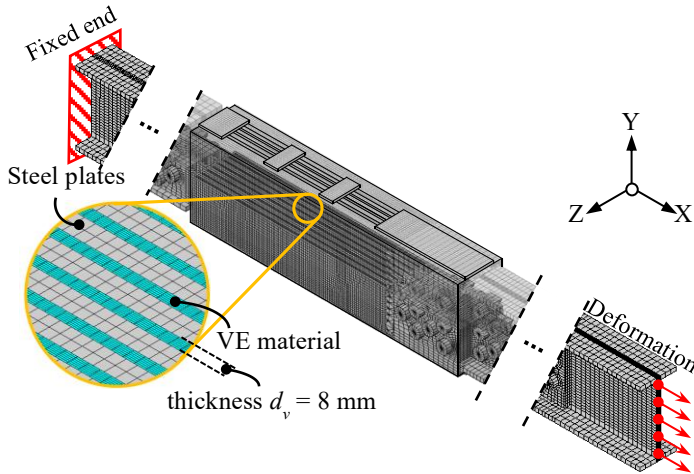


Figure 4. The 3D model of the full-scale eight-layered VE damper and boundary conditions.

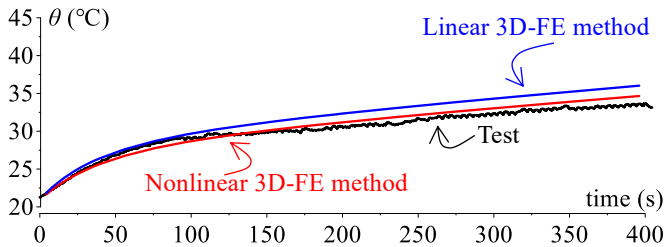


Figure 5. Temperature at measurement point in Section B-B': nonlinear 3D-FE method vs. linear 3D-FE method vs. test.

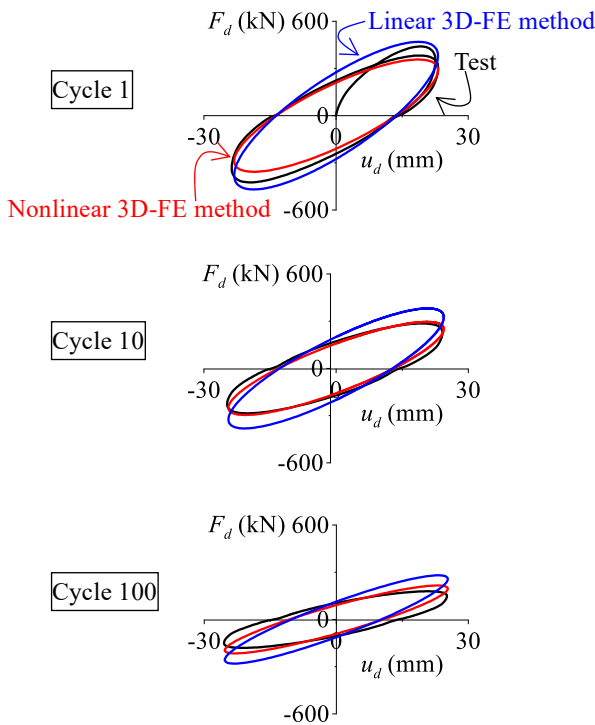


Figure 6. The $F_d - u_d$ hysteresis loops at Cycles 1, 10 and 100: nonlinear 3D-FE method vs. linear 3D-FE method vs. test.

次に、大歪依存性を加えたモデルに静的弾性解析をもう一度行い、得た反力を $F_d^{(n)}$ とする。変形した要素の歪エネルギーにより、1 サイクルでの吸収エネルギー $W_{jk}^{(n)}$ が求まる。ダンパー変形をゼロに戻した後、から算出する発熱量 $\dot{q}_{jk}^{(n)}$ を用いて非定常熱伝導解析を振動波周期の T 秒間行う。得られた各要素、計算点の温度 $\theta_{jk}^{(n+1)}$ と更新・非更新された最大歪 $\gamma_{\max,jk}^{(n)}$ により、次サイクルの材料特性値を更新する。以上を必要なサイクル数の分だけ繰り返す。

3 実大複層粘弾性ダンパーの3次元解析モデル

3.1 ダンパーの実験体および加振概要

本節では、文献 6) で示された実大 8 層粘弾性ダンパーの大振幅加振実験を説明する。Fig. 3 のように、実大ダンパーは 8 層アクリル系粘弾性体（住友 3M 製 ISD111 材）を鋼材の間に挟んだせん断型である。粘弾性体の厚さ・総せん断面積は、それぞれ $d_v = 8$ mm、 $A_s = 13,120$ mm² である。粘弾性体の温度計測は Fig. 3(b) に示すように、第四層の粘弾性体内部の断面に熱電対を設置する。また、歪ゲージは、ブレース部に 6 枚添付する。

载荷では、ダンパー一端を固定して、ほかの一端に加振周期 $T = 4$ s、振幅 24 mm の正弦変位 $u_d(t) = 24 \sin(2\pi t / 4)$ を与える。この振幅は、粘弾性体のみかけのせん断変位振幅、つまり変位振幅と厚さの比が 300% に相当する。正弦波加振を時刻 $t = 400$ s (100 サイクル) まで行う。ダンパー初期温度は 21 °C であり、ダンパー周辺温度は 12.3 °C である。

3.2 3次元解析概要

実験に用いたダンパーの 3 次元有限要素モデルを Fig. 4 に示す。解析には ABAQUS ver. 2020⁷⁾ の変形 - 温度連成 8 節点立体アイソパラメトリック要素を用いた。ダンパーが中心で Y と Z 方向に対称である (Fig. 3b) ことを利用し、本解析では 1/4 のダンパーモデルのみ解析を行う。粘弾性体が厚さ方向に 6 分割としている。実験設置に倣い、ダンパーモデルは同じ端面に X 方向の実験と同様の強制変位を与え、反対側を固定とし、その反力を F'_d とする。ダンパーが Y および Z 方向へは変位しない。本解析において使用した粘弾性材料のパラメーター値は、 $G = 3.92$ N/cm²、 $\alpha = 0.558$ 、 $a_{ref} = 0.000056$ 、 $b_{ref} = 2.10$ 、 $p_1 = 14.06$ 、 $p_2 = 97.32$ 、 $C_1 = 0.124$ 、 $C_2 = -0.182$ である。また、本解析では、熱伝達係数が $\alpha_c = 0$ とした。実験におけるダンパーの振動数が 0.25 Hz と低いことから周りの対流が起こらなかったと考えられ、値は妥当と考えられる。

4 解析結果

4.1 非線形解析結果と実験・線形解析結果の比較

本節では、前章で説明した大振幅正弦波加振実験を対象に、非線形 3 次元解析法および大歪依存性を考慮していない線形 3 次元解析法により解析を行う。そして、それぞれの解析値を実験結果と比較し、非線形 3 次元解析法が大歪依存性を再現できることを確認する。

Figs. 5、6 および 7 は非線形・線形 3 次元解析法で得られた解析値と実験結果を合わせて示す。Fig. 5 に断面 B における計測点での温度を示す。非線形 3 次元解析法の解析値が実験値と良く一致していることが確認できる。それに対して、線形解析値が加振時・加振終了時に実験値より大きいことが確認できる。

Fig. 6 に第 1 サイクル、第 10 サイクル、第 100 サイクルでの $F_d - u_d$ 履歴曲線を示す。ただし、解析値の $F_d - u_d$ 履歴曲線は文献 8) で示された方法より算出している。非線形 3 次元解析法が履歴曲線の厚さの変化を精度良く再現していることが確認できる。また、履歴曲線の傾きについて、非線形 3 次元解析法が線形 3 次元解析法に比べて、誤差を大幅に減少させたことが確認できる。

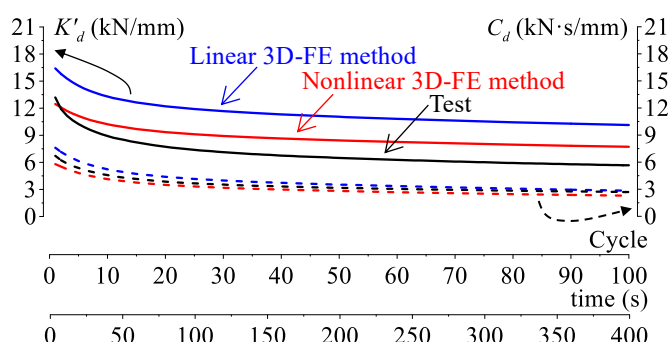


Figure 7. Damper properties K'_d and C_d : nonlinear 3D-FE method vs. linear 3D-FE method vs. test.

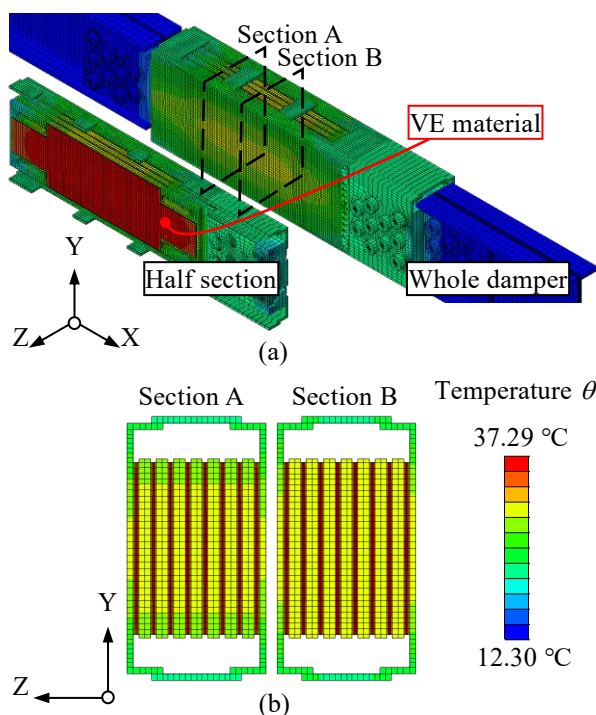


Figure 8. Temperature distributions (a) in the whole damper and half section, and (b) in Sections A and B at $t = 400$ s from nonlinear 3D-FE method.

Fig. 7 に貯蔵剛性 K'_d と粘性係数 C_d の時間的な変化を示す。なお、 K'_d 、 C_d が文献 8) で示された方法よりそれぞれの解析結果および実験結果から算出している。 K'_d 、 C_d が载荷初期で低下し、時間とともに安定になる傾向を持つことが確認できる。加振終了時に K'_d の非線形解析値が実験値の 1.25 倍であり、その線形解析値では実験値の 1.75 倍である。

以上より、非線形 3 次元解析法は、実大複層粘弾性ダンパーが大振幅加振を受ける場合においても大歪依存性を精度良く再現できていることが確認できる。

4.2 実大複層ダンパーの内部温度分布の検討

Fig. 8 に非線形 3 次元解析法で得られた 100 サイクル ($t = 400$ s) での温度分布を示す。Fig. 8(a) で示す半分・全体のダンパーモデルにおける温度分布では、400 s の加振が終了した後、粘弾性体の温度が初期温度の 21 °C から最大 37.99 °C まで上昇した。一方、ダンパー両端のブレース部では周辺温度と同じような 12.3 °C を保っていた。また、Fig. 8(b) に示された断面 A と B での温度分布により、各粘弾性体の内部温度は同じ値を示すことが確認できる。鉄板温度では、より外側にある部分がより低い温度を持つ分布が確認できる。

以上より、粘弾性体から鉄板への熱伝導がまだ十分に行われていないことを確認できる。本解析で熱伝達への影響が小さいとした仮定が妥当と考えられる。

5 まとめ

本報では、実大複層粘弾性ダンパーにおいて、大歪がもたらす性能の変化の影響を把握するために解析的検討を行った。文献 6) で示された実大 8 層粘弾性ダンパーの大振幅正弦波加振実験により、非線形 3 次元解析法の実大複層粘弾性ダンパーへの適用性の検証を行った。その解析値が実験結果および線形 3 次元解析法の解析値を比較することでその実大複層粘弾性ダンパーへの大歪依存性を高精度に再現できることを確認した。

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, 第 543 号, pp. 77-86, 2001. 5
- 2) 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
- 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) 梁其峻, 佐藤大樹, OSABEL Dave, Analytical Method for Viscoelastic Damper Considering Temperature, Frequency, and Strain Sensitivities, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 第 2023 号, pp. 389-390, 2023. 07
- 5) 奥田翔平, 佐藤大樹: 定常熱伝導解析による複層粘弾性ダンパーの動的特性の検討, 日本建築学会関東支部研究報告集, 第 91 号, pp. 369-372, 2021. 03
- 6) 笠井和彦, 佐藤大樹, 松田和浩, 長山祥: 長時間正弦波加振実験による 4 種の実大制振ダンパーの動的特性の変化および簡易評価手法の提案, 構造工学論文集, 第 63B 号, pp. 275-283, 2017. 3
- 7) ABAQUS Manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. 1997
- 8) 梁其峻, 佐藤大樹, OSABEL Dave, CYCLE-BY-CYCLE 3D ANALYSIS OF A FULL-SCALE VE DAMPER UNDER 100% SHEAR STRAIN, 日本建築学会関東支部研究報告集, 第 93 号, pp. 441-444, 2023. 02

*1 東京工業大学 大学院生

*2 東京工業大学 准教授・博士 (工学)

*3 東京工業大学 博士研究員

* Grad. Student, Tokyo Institute of Technology *1

* Associate Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.*2

* Postdoctoral Research Fellow, Tokyo Institute of Technology, PhD.*3