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 | | | | |
| 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

複層粘弾性ダンパー 熱伝導・伝達 一次元モデル 時刻歷解析手法 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

- 正会員 〇 奥田翔平*1 正会員 佐藤大樹 *2
 - IJ Osabel Dave*3

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 Q_N を導入する。

吸熱量 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(単位時間当たりに発生する熱量)であり、内 部吸熱量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 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



duration loading considering dynamic property change with the effect of heat transfer

OKUDA Shohei, SATO Daiki, OSABEL Dave

 $Q_{P,m}$ 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 つの積で求まることに 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.

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

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



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 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 ($1 \le m_V \le M_V$) について、ステップ nにおけ る $u_{dm}^{(n)}$ は適合条件より以下の式で表される.

$$u_{d,m_{V}}^{(n)} = u_{d}^{(n)} = \frac{1}{2} \sum_{j=j_{V_{s,m_{V}}}}^{j_{V_{s,m_{V}}}} \varsigma_{j} \gamma_{j}^{(n)}$$
(2)

ただし、 $\varsigma_{j_{Ys,m_{v}}} = d_{j_{Ys,m_{v}}+1}$ 、 $\varsigma_{j_{Ye,m_{v}}} = d_{j_{Ye,m_{v}}}$ 、 $j_{Ys,m_{v}} < j < j_{Ye,m_{v}}$ 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($j_{Ys,m_{v}} \leq j \leq j_{Ye,m_{v}}$)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).

$$\tau_{m_{V}}^{(n)} + \frac{a_{j}}{\Delta t^{\alpha}} \sum_{i=0}^{N} w^{(i)} \tau_{m_{V}}^{(n-i)} = G_{j} \left(\gamma_{j}^{(n)} + \frac{b_{j}}{\Delta t^{\alpha}} \sum_{i=0}^{N} w^{(i)} \gamma_{j}^{(n-i)} \right)$$
(3)

ここで、 τ_{m_i} :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)}.

$$a_j = a_{ref} \lambda_j^{\alpha}$$
, $b_j = b_{ref} \lambda_j^{\alpha} \lambda_{1,j}$, $G_j = G_{ref} \lambda_{2,j}$ (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.

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

$$\lambda_{1,j} = 1 + C_{1,j} (\gamma_{\max,j} - 1), \quad \lambda_{2,j} = 1 + C_{2,j} (\gamma_{\max,j} - 1)$$
 (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0.09 s 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、載荷初期 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 $\tau_{m_r}^{(n)}$ 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 $\tau_{m_r}^{(n)}$ 、せん断歪 $\gamma_j^{(n)}$ はそれぞれ以下の式で求められる.

$$\tau_{m_{V}}^{(n)} = \left\{ 2u_{d}^{(n)} - \sum_{j=j_{Vs,m_{V}}}^{j_{Vc,m_{V}}} \frac{\varsigma_{j}\left(\widetilde{A}_{j} - \widetilde{B}_{j}\right)}{G_{j}\left(\Delta t^{\alpha} + b_{j}w^{(0)}\right)} \right\} / \sum_{j=j_{Vs,m_{V}}}^{j_{Vc,m_{V}}} \frac{\varsigma_{j}\left(\Delta t^{\alpha} + a_{j}w^{(0)}\right)}{G_{j}\left(\Delta t^{\alpha} + b_{j}w^{(0)}\right)}$$
(6)
$$\gamma_{j}^{(n)} = \frac{\tau_{m_{V}}^{(n)}\left(\Delta t^{\alpha} + a_{j}w^{(0)}\right) + \widetilde{A}_{j} - \widetilde{B}_{j}}{G_{j}\left(\Delta t^{\alpha} + b_{j}w^{(0)}\right)}$$
(7)

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

$$\widetilde{A}_{j} = a_{j} \sum_{i=1}^{N} w^{(i)} \tau_{m_{i'}}^{(n-i)} , \quad \widetilde{B}_{j} = G_{j} b_{j} \sum_{i=1}^{N} w^{(i)} \gamma_{j}^{(n-i)}$$
(8a,b)

ダンパーカ $F_d^{(n)}$ 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.

$$F_{d}^{(n)} = \left(\sum_{m_{V}=1}^{M_{V}} \tau_{m_{V}}^{(n)} / M_{V}\right) A_{s}$$
(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 $\Delta Q_{P,j}$ 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 $\Delta Q_{P,j} = 0$ である.



(a) Actual heat transfer at B-B' section (b) 1D model for analysis Fig. 4 Multi-layer VE damper model for 1D analysis and prediction with constitutive rules

Fig.5 Flowchart of Analysis

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

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 ($1 \le m_s \le M_s$)の各要素 ($j_{ss,m_s} + 1 \le j \le j_{se,m_s}$) 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.

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

なお、ここで $\dot{Q}_{N,j}$ は式(1b)における θ_m 、 $\theta_{m-1} & \epsilon \theta_j$ 、 $\theta_{j-1} & \epsilon$ し、また $\alpha_{ceq,m} & \epsilon \alpha_{ceq,m_s}$ (: m_S 層番目の等価熱伝達係数) に、 $d_m & \epsilon d_{S,m_s}$ (: 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.

$$\Delta \dot{Q}_{j} = \Delta \dot{Q}_{P,j} - \Delta \dot{Q}_{N,j} \tag{12}$$

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.

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

$$\Delta \theta_0^{(n)} = \Delta \dot{Q}_1 / (2s_j \rho), \quad \Delta \theta_J^{(n)} = \Delta \dot{Q}_J / (2s_J \rho_J)$$
(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 ($\overline{\theta}_j^{(n)}$) の影響を合わせて、次式より得られる.

$$\theta_j^{(n+1)} = \Delta \theta_j^{(n)} + \overline{\theta}_j^{(n)}, \quad \overline{\theta}_j^{(n)} = \sum_{k=0}^K x_{jk} \theta_k^{(n)} + y_j$$
(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, $\overline{\theta}_j^{(n)}$ 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 β it, $\alpha = 0.588$, $G_{ref} = 0.0392$ N/mm, $a_{ref} = 5.6 \times 10^{-5}$, $b_{ref} = 2.10$, $p_1 = 14.06$, $p_2 = 97.32$, $\theta_{ref} = 20$ °C, $\Delta t = 0.01$ s, $T_w = 15$ s であり, 初期温度 $\theta_i^{(0)}$ 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_{cea} の値, 各層の要素数は Table2 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' と粘性係数C の時間変化と解析値 を合わせて示す. なお, $K'_d \ge C_d$ 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 | Material | d | Number of | к | S | ρ | α_{ceq} [N/s/m/°C] | |
|--------|----------|------|-----------|-------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------|
| layer | | [mm] | elements | $[N/s/^{\circ}C]$ | [Nmm/kg/°C] | [kg/mm ³] | A-3H-28 | C-3H-24 |
| 1 st | 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



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
- 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 1)
- 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 2) 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
- 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 3) 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
- 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 4) 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

- 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授・博士(工学) *2
- 学生会員 東京工業大学 博士課程 *3



- 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 5) 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
- 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 6) 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
- 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 7) る評価手法,構造工学論文集,第 53B号, pp.67-74, 2007.3)
- 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 8) 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
- 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

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

学生会員 東京工業大学 大学院生 *1