

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	間柱型粘弾性ダンパーを有する制振構造の等価減衰定数の評価 その1 時刻歴応答解析結果に基づく性能評価
Title(English)	Evaluation of equivalent damping constants of structures with stud-type viscoelastic dampers Part1. Performance evaluation based on the results of time history response analysis
著者(和文)	西海隼, 佐藤大樹, Alex Shegay, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也, 金城陽介
Authors(English)	Hayato Nishiumi, Daiki Sato, Alex Shegay, Ryota Tobari, Jumpei Yasunaga, Takuya Ueki, Yosuke Kaneshiro
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ⅰ, , pp. 465-468
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 465-468
発行日 / Pub. date	2023, 2
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

間柱型粘弾性ダンパーを有する制振構造の等価減衰定数の評価

その1 時刻歴応答解析結果に基づく性能評価

構造—振動

正会員 ○ 西海隼^{*1}正会員 佐藤大樹^{*2}〃 Alex Shegay^{*3}〃 戸張涼太^{*4}

制振構造 間柱型粘弾性ダンパー 等価減衰定数

〃 安永隼平^{*5}〃 植木卓也^{*5}

時刻歴応答解析

〃 金城陽介^{*5}

1. はじめに

制振構造の性能評価や応答スペクトルを用いた応答予測・設計手法を確立するにあたり、等価減衰定数の評価は重要であるといえる。履歴型ダンパーや速度依存型ダンパーを有する制振構造の等価減衰定数の評価手法は、等価線形化手法を用いた地震応答予測手法の研究^(例えば1), 2)の中で提案されており、本報で対象としている間柱型粘弾性ダンパーを有する制振構造の等価減衰定数の評価手法は樹下³⁾によって提案されている。しかしながら、文献3)は等価減衰定数評価後の地震応答予測手法を主題としているため、建物モデルに設置されるダンパーの数やその配置が限られており、最大応答値と等価減衰定数の関係性は確認されていない。

そこで、本報ではダンパーの数や配置の異なる複数の建物モデルを用いて、時刻歴応答解析と静的荷重増分解析の結果に基づいて建物全体の等価減衰定数を評価し、最大応答値や荷重レベルとの関係を確認することを目的とする。本報その1では、時刻歴応答解析結果に基づいて建物全体の等価減衰定数の評価を行い、提案された評価手法によって適切に等価減衰定数が評価できること、最大応答値と等価減衰定数の関係を確認する。

2. 解析モデルの概要

2.1 検討対象建物および間柱型粘弾性ダンパーの概要

検討対象建物は鉄骨造地上20階建ての事務所ビル⁴⁾とし、間柱型粘弾性ダンパーの設置数や配置が異なる5つの建物モデルを用いる。図1に軸組図と基準階伏図を示し、表1に各モデルのダンパー数、表2に主架構の部材断面を示す。軸組図の赤線、基準階伏図の赤丸は粘弾性ダンパーの設置箇所を表している。表1より、ダンパー数はモデル1から昇順で多くなり、モデル3とモデル4のダンパー数は同程度であることがわかる。X方向を解析対象とし、主架構は弾性とする。主架構のみの1次固有周期 T_f は2.46秒であり、構造減衰は T_f に対して $\zeta_0=2\%$

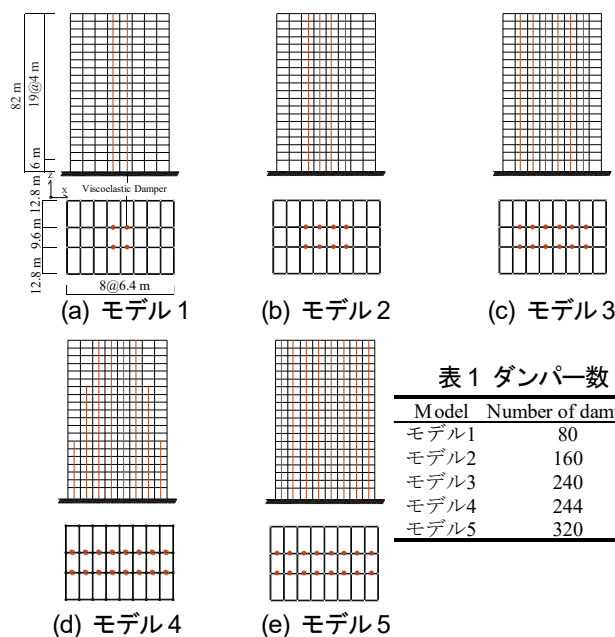


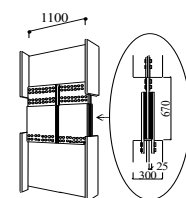
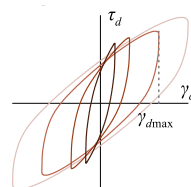
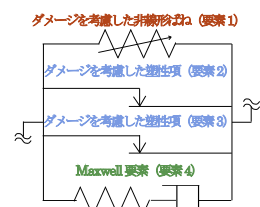
図1 軸組図および基準階伏図

表2 部材断面リスト

Parts	Member
Column	□-500×500×19×19
	□-800×800×36×36
Beam	H-600×250×12×22
	H-850×300×16×25

表1 ダンパー数

Model	Number of dampers
モデル1	80
モデル2	160
モデル3	240
モデル4	244
モデル5	320

図2 間柱型粘弾性ダンパー
(単位: mm)図3 間柱型粘弾性ダンパー
の復元力特性図4 間柱型粘弾性ダンパー
の解析モデル

Evaluation of equivalent damping constants of structures with stud-type viscoelastic dampers Part1. Performance evaluation based on the results of time history response analysis

NISHIUMI Hayato, SATO Daiki, Alex SHEGAY, TOBARI Ryota, YASUNAGA Jumpei, UEKI Takuya, KANESHIRO Yosuke

となる剛性比例型とする。なお、解析には構造計算プログラムである RESP-D, RESP-F3T を用いる。

図 2 に本報で用いる間柱型粘弾性ダンパーを示す。1 つの粘弾性体のサイズは面積 $484 \times 484 \text{ mm}^2$ 、厚さ 25 mm であり、2 つの粘弾性パネルが連なっている。上下の支持部材は H 形鋼からなり、寸法は $\text{H-1100} \times 300 \times 16 \times 28$ とする。図 3 に粘弾性ダンパーのせん断応力度 τ_d とせん断ひずみ γ_d の関係、図 4 に解析モデルを示す。本報で用いる粘弾性ダンパーはせん断ひずみ γ_d 、温度 θ および振動数 f の依存性を有する。加えて、経験最大せん断ひずみ $\gamma_{d\max}$ による剛性および減衰の低減効果を図 4 の要素 1~3 で考慮している⁹⁾。なお、本報では粘弾性ダンパーの初期温度 θ は 10, 20, 30°C とする。

2.2 せん断モデル作成手法の概要

本報ではダンパーが有効に作用する変形（以下、実効変形）を考慮したせん断モデルを用いて検討を行うため、状態 N, R 解析^{6),7)}により得られる骨組特性値をもとに実効変形を適切に評価したせん断モデルを作成する。状態 N, R 解析は、ダンパー部の剛性を 0 とする状態 N, ダンパー部を剛とする状態 R のときに任意の外力を作用させる 2 種類の静的解析である（図 5）。状態 N, R 解析から図 6 に示すせん断モデルの諸元である各層の擬似フレームと擬似ブレースの剛性 K_{fsi} , K_{bsi} および擬似ダンパーのせん断面積 A_{dsi} と厚さ d_{dsi} を算出する。ここで、擬似フレームと擬似ブレースは弾性とする。本報では、擬似ブレースと擬似ダンパーの直列系を併せて付加系、擬似フレームと付加系の並列系を併せてシステムと称する。

なお、本報で用いる間柱型粘弾性ダンパーにおける当該せん断モデルの適用性は樹下ら⁸⁾によって確認されているため、諸元算出の詳細についてはそちらを参照されたい。

3. 時刻歴応答解析

3.1 入力地震動の概要

入力地震動には、1968 年の十勝沖地震における HACHINOHE EW 成分を位相特性とした告示波（以下、ART HACHI）と基整促波⁹⁾である OS1, OS2, SZ1, SZ2 の 5 波を採用する。図 7 に入力地震動の擬似速度応答スペクトル ρS_v ($\xi=5\%$)、エネルギースペクトル V_E ($\xi=10\%$) を示す。また、同図に ${}_1T_f$ を併記する。図 7 より、 ${}_1T_f$ では SZ1 の応答が最も大きく、レベル 2 相当の地震波である ART HACHI の約 2 倍となる。

3.2 解析結果

本節では、時刻歴応答解析による最大応答値の比較を行う。図 8 に検討した解析ケースの代表として粘弾性ダンパーの初期温度を 10, 30°C とした場合の ART HACHI と SZ1 入力時の各モデルの層間変形角の高さ方向分布を示す。図 8 より、粘弾性ダンパーの初期温度に着目すると、粘弾性ダンパーの初期温度が 30°C のときには 10°C のときと比較して、特に SZ1 入力時において各モデル間での最大応答値

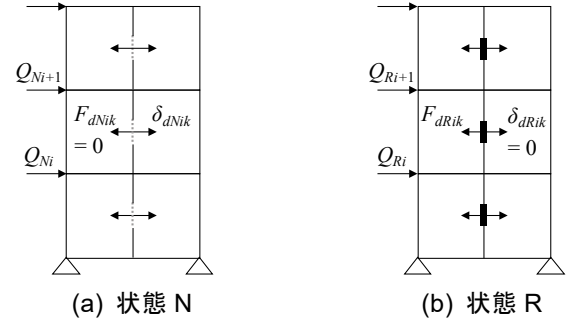


図 5 状態 N, R 解析の概念図

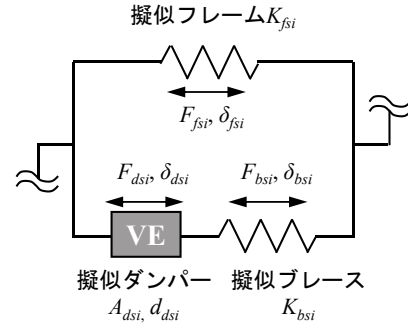


図 6 せん断モデルの概念図

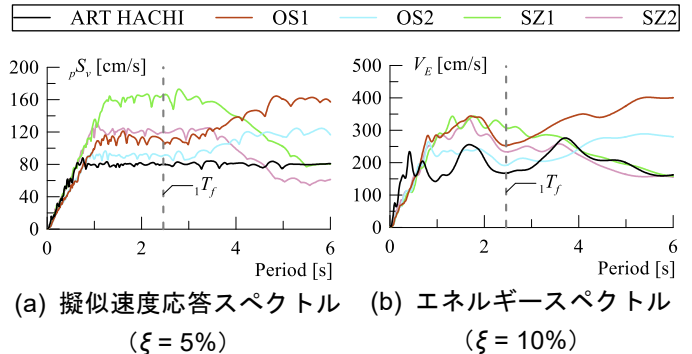


図 7 入力地震動の応答スペクトル

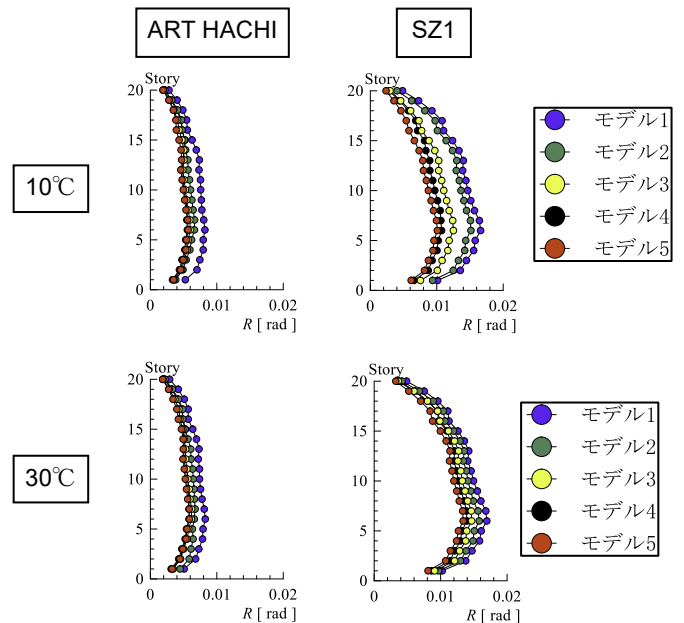


図 8 層間変形角の高さ方向分布

の差が小さくなることを確認できる。

各モデル間での最大応答値に着目すると、表 1 のダンパー数が多いモデルほど、最大応答値が小さくなる傾向を確認できる。また、モデル 3 とモデル 4 のようにダンパー数が同程度だが、その配置が異なるモデルで比較すると、モデル 4 の方がモデル 3 より応答が小さくなることを確認できる。したがって、ダンパー数だけでなくダンパーの配置の違いも最大応答値に影響を与えることがわかる。なお、紙幅の都合上省略した解析ケースにおいても同様の結果が得られることを確認している。

4. 時刻歴応答解析結果に基づく等価減衰定数の評価

4.1 等価減衰定数の評価手法

本報で対象としている間柱型粘弾性ダンパーを有する制振構造の等価減衰定数の評価式は樹下ら³⁾によって提案されており、本報でもその手法を採用する。文献 3)では、粘弾性ダンパーのせん断ひずみ γ_{dsi} が未知数であるため、収斂計算を用いて等価減衰定数を評価している。一方で本報の場合、時刻歴応答解析で各時刻の粘弾性ダンパーのせん断ひずみの値は既知であるため、最大せん断ひずみ γ_{dsimax} を評価に用いた。以下に評価手順の概要を示す。

1. 時刻歴応答解析による粘弾性ダンパーの最大水平変形 δ_{dsimax} と厚さ d_{dsi} から最大せん断ひずみ γ_{dsimax} を次式で算出する。

$$\gamma_{dsimax} = \delta_{dsimax} / d_{dsi} \quad (1)$$

2. 擬似ダンパーの等価剛性 K_{deqsi} 、付加系の等価剛性 K_{aeqsi} およびシステムの等価剛性 K_{eqsi} をそれぞれ式(2)～(4)で算出する。

$$K_{deqsi} = \frac{A_{dsi} \cdot \tilde{G}_{eq}}{d_{dsi}} \cdot g_{\lambda_{\gamma i}} \cdot g_{\lambda_{\theta}} \cdot g_{\lambda_f} \quad (2)$$

$$K_{aeqsi} = \frac{K_{bsi} \cdot K_{deqsi}}{K_{bsi} + K_{deqsi}} \quad (3)$$

$$K_{eqsi} = K_{fsi} + K_{aeqsi} \quad (4)$$

ここで、 $\tilde{G}_{eq}$ は温度 20℃、振動数 0.33 Hz、せん断ひずみ 100%時における粘弾性ダンパーの等価せん断弾性率 (= 0.641 N/mm²)である。また、 $g_{\lambda_{\theta}}$ 、 g_{λ_f} 、 $g_{\lambda_{\gamma i}}$ はそれぞれ等価せん断弾性率の温度補正係数、振動数補正係数、せん断ひずみ補正係数であり、それぞれ式(5)～(7)で定義される¹⁰⁾。

$$g_{\lambda_{\theta}} = -9.029 \times 10^{-5} \times \theta^2 - 1.668 \times 10^{-2} \times \theta + 1.3697 \quad (5)$$

$$g_{\lambda_f} = 1.1836 + 0.3813 \times \log_{10} f \quad (6)$$

$$g_{\lambda_{\gamma i}} = 0.42960 + 2.6355e^{-\frac{\gamma_{dsimax}}{0.65317}} + 5.5626e^{-\frac{\gamma_{dsimax}}{0.10130}} \quad (7)$$

ここで、振動数 f は $1/T_f$ の逆数として $f = 1/T_f$ とした。

3. 最大応答での定常振幅時における i 層の 1 次等価減衰定数 $1\xi_{eqimax}$ を次式で算出する。

$$1\xi_{eqimax} = \Delta W_{si} / 4\pi W_{si} \quad (8)$$

ここで、 W_{si} は各層の弾性ひずみエネルギー、 ΔW_{si} は各層の 1 サイクルの吸収エネルギーであり、それぞれ式(9)、(10)で表される。

$$W_{si} = Q_{f_{si}}^2 / 2K_{eqsi} \quad (9)$$

$$\Delta W_{si} = A_{dsi} \cdot d_{dsi} (E_{1i} + E_{2i} + E_{3i} + E_{4i}) \quad (10)$$

ここで、 $Q_{f_{si}}$ は擬似フレームに作用する最大層せん断力である。また、本報の粘弾性ダンパーは図 4 のように 4 要素モデルであり、式(10)中の E_{1i} 、 E_{2i} 、 E_{3i} 、 E_{4i} は各層の 4 要素それぞれのエネルギー吸収量を各層の粘弾性ダンパーの体積で除した値である。ここでは、2 サイクル目以降の定常振動を想定して、 E_{1i} 、 E_{2i} 、 E_{3i} 、 E_{4i} をそれぞれ式(11)～(14)で算出する¹¹⁾。

$$E_{1i} = 0 \quad (11)$$

$$E_{2i} = 2 \cdot G_{p1} \cdot l_1 \left\{ 2 \cdot \gamma_{dsimax} - l_1 \left(2 - e^{-\frac{\gamma_{dsimax}}{l_1}} \right) \left(1 - e^{-\frac{2\gamma_{dsimax}}{l_1}} \right) \right\} \quad (12)$$

$$E_{3i} = 2 \cdot G_{p2} \cdot l_2 \left\{ 2 \cdot \gamma_{dsimax} - l_2 \left(2 - e^{-\frac{\gamma_{dsimax}}{l_2}} \right) \left(1 - e^{-\frac{2\gamma_{dsimax}}{l_2}} \right) \right\} \quad (13)$$

$$E_{4i} = \frac{2\pi^2 f v}{1 + (2\pi f v)^2} \cdot g'_v \cdot \gamma_{dsimax}^2 \quad (14)$$

ここで、 G_{p1} 、 G_{p2} は最大せん断ひずみによる減衰の低減係数であり、最大せん断ひずみ γ_{dsimax} で定常振動した場合、それぞれ式(15)、(16)で算出される⁵⁾。

$$G_{p1} = \left\{ \theta_p + (1 - \theta_p) e^{-\frac{\gamma_{dsimax}}{\alpha_p}} \right\} \cdot g'_{p1} \quad (15)$$

$$G_{p2} = \left\{ \theta_p + (1 - \theta_p) e^{-\frac{\gamma_{dsimax}}{\alpha_p}} \right\} \cdot g'_{p2} \quad (16)$$

l_1 、 l_2 、 v 、 g'_v 、 θ_p 、 α_p 、 g'_{p1} 、 g'_{p2} は粘弾性体の材料定数であり、特に g'_v 、 g'_{p1} 、 g'_{p2} は粘弾性ダンパーの初期温度によって変化し、それぞれ次式で表される⁵⁾。

$$g'_v = g_{\lambda_{\theta}} \cdot {}_H\lambda_{\theta} \cdot g_v \quad (17)$$

$$g'_{p1} = g_{\lambda_{\theta}} \cdot {}_H\lambda_{\theta} \cdot g_{p1} \quad (18)$$

$$g'_{p2} = g_{\lambda_{\theta}} \cdot {}_H\lambda_{\theta} \cdot g_{p2} \quad (19)$$

ここで、 g_v 、 g_{p1} 、 g_{p2} は粘弾性ダンパーの初期温度 20℃の場合の材料定数、 ${}_H\lambda_{\theta}$ は等価減衰定数の温度補正係数であり、次式で定義される¹⁰⁾。

$${}_H\lambda_{\theta} = -2.108 \times 10^{-4} \times \theta^2 + 5.958 \times 10^{-3} \times \theta + 0.9652 \quad (20)$$

表 3 に粘弾性ダンパーの初期温度が 20℃の場合の材料定数の一覧を示す⁵⁾。

表 3 粘弾性体の材料定数

Parameter	Unit	Value
g_{p1}	N/mm ²	13.841
g_{p2}	N/mm ²	1.1235
l_1	-	0.0075579
l_2	-	0.17561
g_v	N/mm ²	0.46832
v	sec	0.085118
θ_p	-	0.00062019
α_p	-	4.1429

4. $1\zeta_{eqimax}$ に最大振幅時の等価減衰定数を積分平均値に変換する係数（積分平均係数） A_i を乗じて、近似的に各層の等価減衰定数の積分平均値を評価する。擬似フレームのみの j 次固有周期を用いて振動数を算出した場合の i 層の積分平均係数 ${}_jA_i$ および等価減衰定数の積分平均値 $1\zeta_{eqi}$ はそれぞれ式(21), (22)で表される³⁾。

$${}_jA_i = \frac{0.0598(K_{bsi}/K_{fsi})^{0.226}}{(K_{deqsi}^*/K_{fsi})^{0.465} \cdot \left(\frac{1}{T_i}\right)^{0.535} \cdot \gamma_{dsimax}} \quad (21)$$

$$+ \frac{0.682(K_{bsi}/K_{fsi})^{0.140}}{(K_{deqsi}^*/K_{fsi})^{0.228}}$$

$$1\zeta_{eqi} = 1\zeta_{eqimax} \cdot {}_jA_i \quad (22)$$

ここで、 K_{deqsi}^* は温度および振動数による剛性の変化を考慮したせん断ひずみ 100%時の粘弾性ダンパーの等価剛性であり、次式で表される。

$$K_{deqsi}^* = \frac{A_{dsi} \cdot \tilde{G}_{eq}}{d_{dsi}} \cdot {}_G\lambda_\theta \cdot {}_G\lambda_f \quad (23)$$

5. 各層の 1 次等価減衰定数 $1\zeta_{eqi}$ を弾性ひずみエネルギー W_{si} で重み付けし、建物全体の 1 次等価減衰定数 $1\zeta_{eqTHA}$ を次式で算出する。

$$1\zeta_{eqTHA} = 1\zeta_0 + \frac{\sum_{i=1}^N 1\zeta_{eqi} \cdot W_{si}}{\sum_{i=1}^N W_{si}} \quad (24)$$

4.2 等価減衰定数の妥当性の検証とその評価

前節の手順で算出した建物全体の 1 次等価減衰定数 $1\zeta_{eqTHA}$ を表 4 に示す。また、 $1\zeta_{eqTHA}$ の妥当性を確認するために、図 9 にモデル 4（粘弾性ダンパーの初期温度：10℃）と減衰定数を変動させた主架構のみの建物モデル（以下、非制振モデル）の最大層間変形角の高さ方向分布の比較を示す。表 4 より、粘弾性ダンパーの初期温度が 10℃の場合のモデル 4 は $1\zeta_{eqTHA} = 7\%$ 程度であることがわかる。そして、図 9 からモデル 4 の最大層間変形角は非制振モデルの減衰定数 6～8%の応答と同程度であることを踏まえると、表 4 の $1\zeta_{eqTHA}$ は妥当な結果であると考えられる。

粘弾性ダンパーの初期温度に着目して表 4 の $1\zeta_{eqTHA}$ を比較すると、初期温度が高いほど $1\zeta_{eqTHA}$ は小さくなり、特に SZ1 入力時には各モデル間での $1\zeta_{eqTHA}$ の差も小さくなる傾向があることがわかる。これは、図 8 において最大応答値の差が小さくなることと対応している。また、各モデル間で $1\zeta_{eqTHA}$ を比較すると、3.2 節でダンパー数が多いモデルほど最大応答値が小さくなることを確認したが、これはダンパー数が増えることによる $1\zeta_{eqTHA}$ の増大と対応していることがわかる。同様に、モデル 3 とモデル 4 のようなダンパー数が同程度のモデルで比較すると、 $1\zeta_{eqTHA}$ はモデル 4 がモデル 3 を上回る傾向があることから、図 8 の最大応

表 4 建物全体の 1 次等価減衰定数 $1\zeta_{eqTHA}$ （単位：％）

Temperature	Ground Motion	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
10 °C	ART HACHI	3.25	4.81	6.42	7.09	7.70
	OS1	3.28	4.75	6.30	7.10	7.60
	OS2	3.28	4.83	6.44	7.23	7.73
	SZ1	3.24	4.56	6.02	6.75	7.38
	SZ2	3.28	4.74	6.24	6.99	7.52
20 °C	ART HACHI	3.25	4.82	6.43	7.06	7.72
	OS1	3.24	4.64	6.43	6.84	7.38
	OS2	3.28	4.78	6.39	7.16	7.69
	SZ1	3.17	4.39	5.66	6.23	6.87
	SZ2	3.24	4.62	6.00	6.67	7.20
30 °C	ART HACHI	3.18	4.57	6.13	6.65	7.32
	OS1	3.12	4.34	5.60	6.15	6.69
	OS2	3.19	4.52	5.93	6.54	7.19
	SZ1	3.03	4.06	5.07	5.44	5.95
	SZ2	3.11	4.29	5.48	5.98	6.47

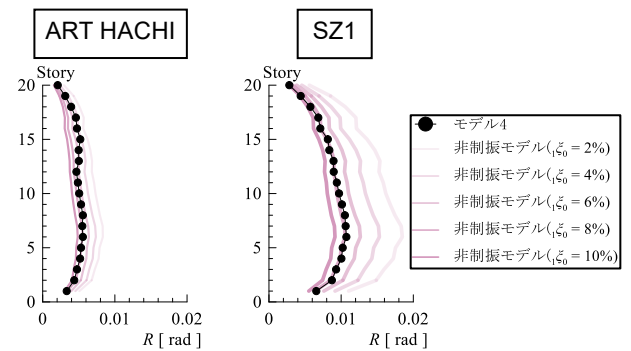


図 9 モデル 4 と減衰定数を変動させた非制振モデルの最大層間変形角の高さ方向分布（初期温度：10℃）

答値と同様にダンパーの配置が $1\zeta_{eqTHA}$ に与える影響も確認することができる。

以上のことから、間柱型粘弾性ダンパーを有する制振構造の等価減衰定数 $1\zeta_{eqTHA}$ は各モデルの時刻歴最大応答値の大小関係を再現できることがわかる。

5. まとめ

本報その 1 では、間柱型粘弾性ダンパーを有する制振構造の等価減衰定数を時刻歴応答解析結果に基づいて評価した。得られた知見を以下に示す。

1. 間柱型粘弾性ダンパーを有する制振構造の等価減衰定数は、文献 3) の手法を準用して、時刻歴応答解析による粘弾性ダンパーの最大せん断ひずみの値から評価できることがわかった。
2. 間柱型粘弾性ダンパーを有する制振構造の等価減衰定数は各モデルの時刻歴最大応答値の大小関係を再現できることがわかった。

謝辞および参考文献は本報その 2 にまとめて示す。

*1 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 東京工業大学 未来産業技術研究所 助教・Ph.D.

*4 JFE シビル株式会社

*5 JFE スチール株式会社

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology *1

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

Assistant Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.*3

JFE Civil Engineering & Construction Corporation *4

JFE Steel Corporation *5