

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2 静的荷重増分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 Part2. Performance evaluation based on the results of pushover 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, , , pp. 469-472
Citation(English)	, , , pp. 469-472
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2 静的荷重増分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}

// 安永隼平^{*5}

// 植木卓也^{*5}

制振構造 間柱型粘弾性ダンパー 等価減衰定数

荷重増分解析 静的解析

1. はじめに

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建物全体の等価減衰定数を時刻歴応答解析の結果に基づいて評価し、文献3)で提案された評価式によって適切に等価減衰定数が評価できることを確認した。また、複数の建物モデルを用いて最大応答値と等価減衰定数の対応関係を確認することで、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時刻歴最大応答値の大小関係を再現できることを確認した。

本報その2では、静的荷重増分結果に基づいて建物全体の等価減衰定数の評価を行い、荷重レベル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

検討対象建物は本報その1と同様の5つの建物モデルとし、各々の建物モデルに対して状態N、R解析^{6),7)}を行い、得られた骨組特性値をもとに作成したせん断モデルを使用する。図1に軸組図と基準階伏図、図2にせん断モデルの概念図、表1に各モデルのダンパー数を示す。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。検討対象建物、せん断モデル化および間柱型粘弾性ダンパーの詳細については、本報その1を参照されたい。

2.2 粘弾性ダンパーのトリリニア近似

本報で用いる間柱型粘弾性ダンパーは解析プログラムの都合上、静的解析において剛性を持たないので、文献3)を参考に、図3に示す初期温度20°C、振動数0.33 Hzの粘弾性ダンパーの骨格曲線を図4に示すようにトリリニアモデルのせん断ばねで近似する。

トリリニアモデルの初期せん断弾性率 G_{d1} は、原点と骨格曲線上のせん断ひずみ10%の点を結ぶ割線の傾きとし、

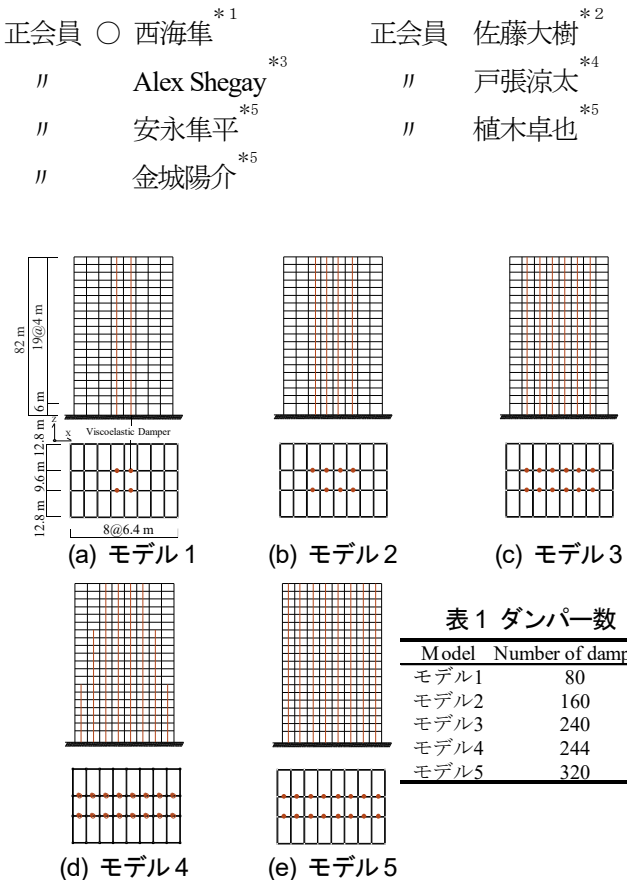


表1 ダンパー数

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1 軸組図および基準階伏図

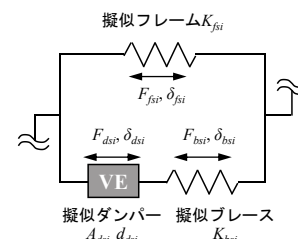


図2 せん断モデルの概念図

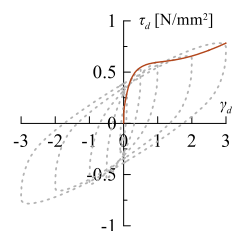


図3 間柱型粘弾性ダンパーの骨格曲線

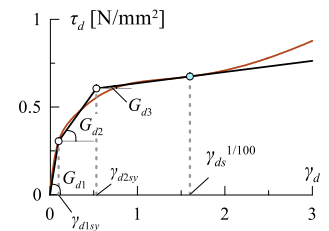


図4 粘弾性ダンパーのトリリニアモデル

Evaluation of equivalent damping constants of structures with stud-type viscoelastic dampers Part2. Performance evaluation based on the results of pushover analysis

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

せん断ひずみ 10%を第一折れ点のせん断ひずみ γ_{d1sy} とする。第三せん断弾性率 G_{d3} は、層間変形とダンパー変形が同一となる場合を想定し、そのときの層間変形角 1/100 rad 時点での骨格曲線の接線の傾きとする。検討対象建物は、第1層を除いて各層の高さ 4.0 m、粘弾性ダンパーの厚さ 25 mm であることから、層間変形角 1/100 rad 時点の接点のせん断ひずみは $\gamma_{ds}^{1/100} = 1.6$ である。また、 $\gamma_{ds}^{1/100}$ までの骨格曲線と横軸が囲む面積 (図5) と $\gamma_{ds}^{1/100}$ までのトリリニアモデルと横軸が囲む面積 (図6) が等しくなる点を第二折れ点のせん断ひずみ γ_{d2sy} とし、第二せん断弾性率 G_{d2} を設定する。

そして、各層の擬似ダンパーのせん断面積 A_{dsi} 、厚さ d_{dsi} を用いて、トリリニアモデルのせん断弾性率 G_{d1} 、 G_{d2} 、 G_{d3} および折れ点せん断ひずみ γ_{d1sy} 、 γ_{d2sy} をそれぞれ次式で剛性、折れ点変位に変換する。

$$K_{d1si} = A_{dsi} \cdot G_{d1} \cdot c_{\lambda\theta} \cdot c_{\lambda f} / d_{dsi} \quad (1)$$

$$K_{d2si} = A_{dsi} \cdot G_{d2} \cdot c_{\lambda\theta} \cdot c_{\lambda f} / d_{dsi} \quad (2)$$

$$K_{d3si} = A_{dsi} \cdot G_{d3} \cdot c_{\lambda\theta} \cdot c_{\lambda f} / d_{dsi} \quad (3)$$

$$\delta_{d1syi} = \gamma_{d1sy} \cdot d_{dsi} \quad (4)$$

$$\delta_{d2syi} = \gamma_{d2sy} \cdot d_{dsi} \quad (5)$$

ここで、 K_{d1si} 、 K_{d2si} 、 K_{d3si} はトリリニアモデルの第一、第二、第三剛性であり、 δ_{d1syi} 、 δ_{d2syi} はトリリニアモデルの第一、第二折れ点の変位である。また、式(1)~(3)中の $c_{\lambda\theta}$ 、 $c_{\lambda f}$ はそれぞれ等価せん断弾性率の温度補正係数、振動数補正係数であり、それぞれ次式で定義される¹⁰⁾。

$$c_{\lambda\theta} = -9.029 \times 10^{-5} \times \theta^2 - 1.668 \times 10^{-2} \times \theta + 1.3697 \quad (6)$$

$$c_{\lambda f} = 1.1836 + 0.3813 \times \log_{10} f \quad (7)$$

ここで、 $f = 1/T_f$ とした。

3. 静的荷重増分解析

3.1 静的地震荷重の概要

本報で使用する地震荷重 P_i は地震地域係数 $Z = 1$ 、第二種地盤を想定した A_i 分布に基づくものとする。各モデルの総重量は約 290000 kN であり、ダンパーの重量もモデル化しているため、ダンパー数が最少のモデル 1 と最大のモデル 5 で総重量は 0.7% 程度異なる。

3.2 解析結果

本節では、静的荷重増分解析による層せん断力 Q_s と層間変形 δ_s の関係を確認する。図7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℃とした場合の層せん断力と層間変形の関係を示す。また、同図にベースシア係数 C_b が 0.1、0.2、0.3 となるステップをそれぞれ赤、青、緑線で併せて示す。

図7より、すべてのケースで最も層間変形が大きくなるのは6層目であることがわかり、これは本報その1の時刻歴応答解析結果と同様の傾向である。各モデル間で比較すると、表1のダンパー数が多いモデルほど、同じ C_b のときに層間変形が小さくなる傾向や C_b の増大に伴って剛性

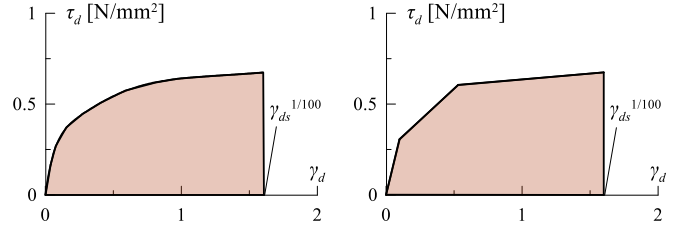


図5 骨格曲線と横軸

図6 トリリニアモデルと

が囲む面積

横軸が囲む面積

○-○-○ $C_b = 0.1$ ○-○-○ $C_b = 0.2$ ○-○-○ $C_b = 0.3$

10℃

30℃

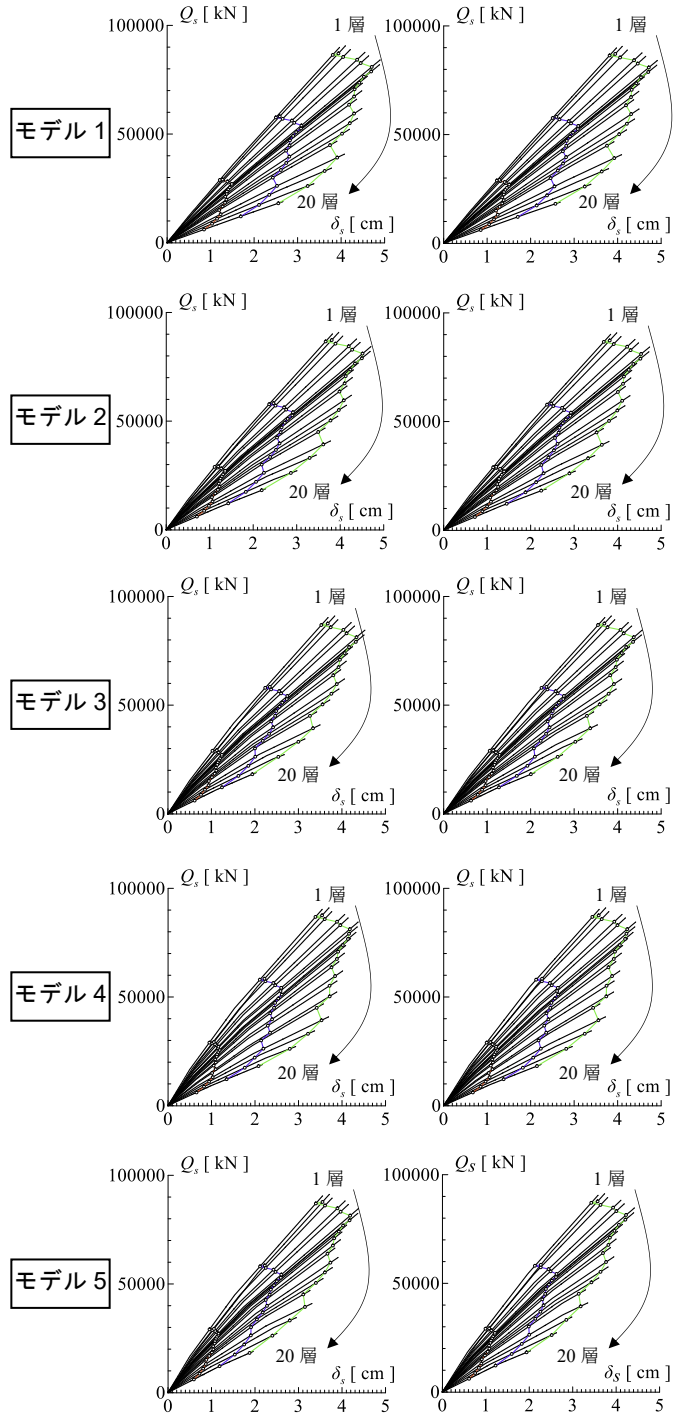


図7 層せん断力と層間変形の関係

が低下するような非線形性が強くなる傾向を確認できる。このことから、静的解析において粘弾性ダンパーのトリリニア近似を用いた場合でも、ダンパー付加による効果を再現できていることがわかる。また、初期温度で比較した場合、初期温度による層間変形の違いはあるものの、その影響は小さいことがわかる。

4. 静的荷重増分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

本報その1では、時刻歴応答解析で得られた時刻歴最大せん断ひずみ γ_{dsimax} を用いて建物全体の等価減衰定数を評価し、文献3)で提案された評価手法の妥当性を確認した。本報では、静的荷重増分解析で得られた各ステップのせん断ひずみ γ_{dsi} を用いて建物全体の等価減衰定数を評価し、等価減衰定数と荷重レベルの関係を確認する。評価手法の基本的な流れは本報その1と同様であり、評価手法中の変数である時刻歴最大せん断ひずみ γ_{dsimax} を各ステップのせん断ひずみ γ_{dsi} に、擬似フレームに作用する時刻歴最大層せん断力 Q_{jsimax} を各ステップの擬似フレームに作用する層せん断力 Q_{jsi} に置き換える点のみが異なる。等価減衰定数の評価手法の詳細は、本報その1を参照されたい。

4.2 等価減衰定数の評価

前節の手順で算出した建物全体の1次等価減衰定数 $1\zeta_{eqPOA}$ と C_b の関係を図8に示す。同図に本報その1で構造減衰として設定した減衰定数 $1\zeta_0 (= 2\%)$ を併せて示している。また、表2にモデル4、初期温度10°Cの場合の時刻歴応答解析結果に基づく1次等価減衰定数 $1\zeta_{eqTHA}$ 、時刻歴最大ベースシア係数 C_{bmax} 、 C_{bmax} 時の $1\zeta_{eqPOA}$ および $1\zeta_{eqTHA}$ に対する $1\zeta_{eqPOA}$ の比 $1\zeta_{eqPOA} / 1\zeta_{eqTHA}$ を示す。表2より、 $1\zeta_{eqPOA}$ は、 $1\zeta_{eqTHA}$ を最大でも誤差7%以内で評価できることがわかる。これは、 $1\zeta_{eqPOA}$ や $1\zeta_{eqTHA}$ の評価手法の最後に各層の弾性ひずみエネルギー W_{si} で重み付けしており、図9の層間変形角の分布が W_{si} の大きい中低層で概ね同様であることから妥当な結果であると考えられる。

図8より C_b が0.05程度以下のとき $1\zeta_{eqPOA}$ は大きな値となることがわかる。しかしながら、構造設計において対象とする C_b は表2の C_{bmax} からわかるように $C_b = 0.2$ 程度であるため C_b が0.05程度以下の応答が小さい範囲での $1\zeta_{eqPOA}$ は大きな問題にはならないと考える。以下、 C_b が0.05程度以下のとき $1\zeta_{eqPOA}$ が大きくなる理由を考察する。評価手法の過程で算出する定常応答時の1次等価減衰定数 ζ_{eqi} は式(8)で表され、弾性ひずみエネルギー W_{si} と1サイクルの吸収エネルギー ΔW_{si} の比で表される。図10の拡大範囲に示すように式(9)を用いて算出される W_{si} と C_b の関係は2次関数の形式であり、一方で式(10)を用いて算出される ΔW_{si} と C_b の関係は C_b が小さいとき線形に近い形式となる。そのため C_b が小さいときに W_{si} は ΔW_{si} よりも非常に小さな値となり、式(8)の分母が発散するような形で最終的に求

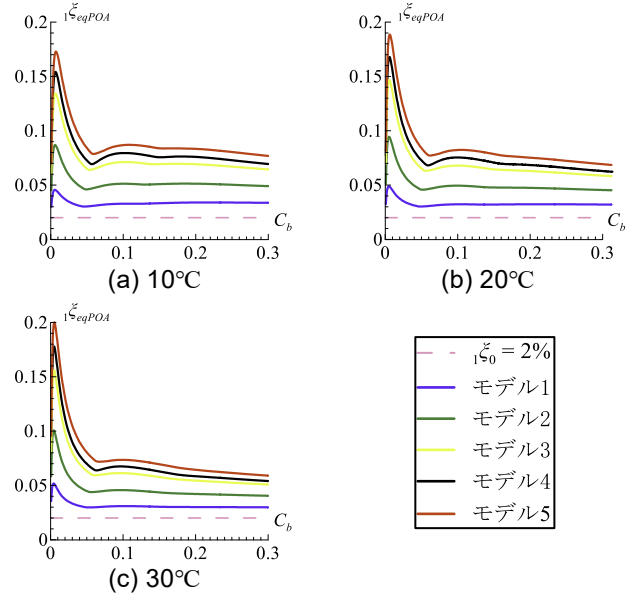
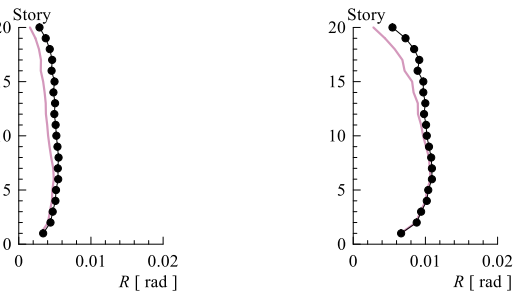


図8 1次等価減衰定数とベースシア係数の関係

表2 時刻歴応答解析と静的荷重増分解析結果に基づく1次等価減衰定数の比較 (モデル4, 初期温度10°C)

Ground Motion	$1\zeta_{eqTHA}$	C_{bmax}	$1\zeta_{eqPOA}$	$1\zeta_{eqPOA} / 1\zeta_{eqTHA}$
ARTHACHI	7.09	0.17	7.62	1.07
OS1	7.10	0.23	7.43	1.05
OS2	7.23	0.20	7.60	1.05
SZ1	6.75	0.32	6.83	1.01
SZ2	6.99	0.28	7.07	1.01

● 静的荷重増分解析 — 時刻歴応答解析



(a) ART HACHI 入力時 (b) SZ1 入力時

図9 層間変形角の高さ方向分布 (モデル4, 初期温度10°C)

— 弾性ひずみエネルギー W_{si} — 1サイクルの吸収エネルギー ΔW_{si}

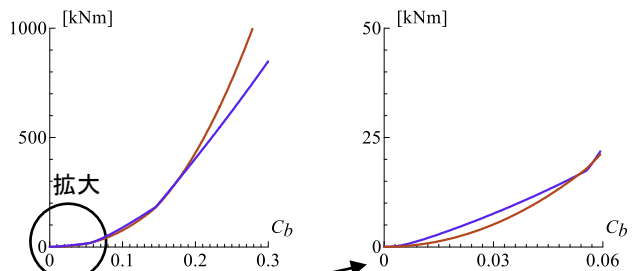


図10 弾性ひずみエネルギーとベースシア係数の関係と1サイクルの吸収エネルギーとベースシア係数の関係 (モデル4, 6層目, 初期温度10°C)

められる ξ_{eqPOA} が大きな値となると考える。

$$\xi_{eqi} = \frac{\Delta W_{si}}{4\pi W_{si}} \quad (8)$$

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

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

ここで、 K_{eqsi} はシステムの等価剛性であり、 E_{1i} 、 E_{2i} 、 E_{3i} 、 E_{4i} は粘弾性ダンパーの解析モデルを構成する 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。用語の定義や算出手法の詳細は本報その 1 を参照されたい。

そして、 ξ_{eqPOA} は初期温度が 10°C のときには $C_b = 0.05$ 程度以降で概ね一定といえるが、初期温度が高くなるにつれてダンパー数の多いモデルほど減少していく傾向が強くなり、各モデルの差が小さくなっていくことがわかる。しかしながら、どの初期温度においても C_b の値によらず、本報その 1 と同様に図 7 における層間変形の小さいモデルほど ξ_{eqPOA} が大きくなることから、時刻歴応答解析を用いずとも静的解析によって建物モデルの制振性能の優劣を評価できることが示唆される。

5. まとめ

本報その 2 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静的荷重増分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や各モデルの制振性能の優劣は、時刻歴応答解析を用いずとも、静的解析によって評価できることがわかった。
2. 静的荷重増分解析結果に基づいて評価した等価減衰定数は、ベースシア係数が 0.05 程度以下のときに大きな値となることがわかった。
3. ベースシア係数が 0.05 程度以降の等価減衰定数は、粘弾性ダンパーの初期温度が 10°C のときには概ね一定となり、初期温度が高くなるにつれてダンパー数の多いモデルほど減少していく傾向が強くなり、各モデルの差が小さくなることがわかった。

謝辞

本報は、JFE シビル株式会社、JFE スチール株式会社、東京工業大学佐藤研究室の共同研究の成果の一部をまとめたものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 石井正人, 和田章: 履歴型ダンパーを設置した鋼構造建物の等価線形化法による地震応答予測, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.632, pp.1735-1743, 2008.10
- 2) 石井正人, 和田章: 速度依存型ダンパーを設置した鋼構造建物の等価線形化法による地震応答予測, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.639, pp.803-812, 2009.5
- 3) 樹下亮佑, 佐藤大樹, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也, 金城陽介: 振幅依存性を有する間柱型粘弾性ダンパーの等価線形化に基づく地震応答予測, 日本建築学会構造系論文集, Vol.88, No.803, pp.47-58, 2023.1
- 4) 日本建築学会: 鋼構造制振設計指針第 1 版, 2014.11
- 5) 森隆浩, 櫻井祐, 加藤亨二, 戸張涼太, 吉永光寿, 金城陽介: 高減衰ゴムを用いた間柱型粘弾性ダンパー ~その 2 時刻歴応答解析用履歴モデル~, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-II, pp.597-598, 2017
- 6) 笠井和彦, 岩崎啓介: 様々な形式の制振構造における自由度縮約法と水平バネ系への変換法, 日本建築学会構造系論文集, No.605, pp.37-46, 2006.7
- 7) 石井正人, 笠井和彦: 多層制振構造の時刻歴解析に用いるせん断棒モデルの提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.647, pp.103-112, 2010.1
- 8) 樹下亮佑, 佐藤大樹, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也, 金城陽介: 間柱型粘弾性ダンパーと履歴型ダンパーを並列配置した超高層制振建物のせん断モデル化手法, 日本建築学会技術報告集, Vol.28, No.68, pp.103-108, 2022.2
- 9) 国土交通省: 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について (技術的助言), 国住指 1111 号, 2016.6
- 10) 金城陽介, 植木卓也, 村上行夫, 戸張涼太, 宮川和明, 森隆浩: 高減衰ゴムを用いた間柱型粘弾性ダンパー ~その 1 実大実験による性能評価~, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-II, pp.595-596, 2017
- 11) 戸張涼太, 佐藤大樹: 非線形粘弾性ダンパーを有する制振構造のエネルギー応答予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-II, pp.697-698, 2021

*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