

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	振幅依存性を有する間柱型粘弾性ダンパーの繰り返し加振による性能低下を考慮した超高層建物の地震応答予測手法 その2 応答予測手法の精度検証
Title(English)	Seismic Response Prediction Method for High-rise Buildings Considering Performance Degradation of Stud-type Viscoelastic Dampers with Amplitude Dependencies Part2 Accuracy verification of Seismic Response Prediction Method
著者(和文)	西海隼, 佐藤大樹, 樹下亮佑, Alex Shegay, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也, 森岡宙光
Authors(English)	NISHIUMI Hayato, SATO Daiki, KINOSHITA Ryosuke, Alex SHEGAY, Ryota Tobari, YASUNAGA Jumpei, UEKI Takuya, MORIOKA Hiromitsu
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ⅰ, , pp. 433-436
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 433-436
発行日 / Pub. date	2024, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

振幅依存性を有する間柱型粘弾性ダンパーの繰り返し加振による性能低下 を考慮した超高層建物の地震応答予測手法

その2 応答予測手法の精度検証

構造—振動

制振構造 間柱型非線形粘弾性ダンパー 性能低下
超高層建物 長周期地震動 地震応答予測

正会員 ○ 西海隼^{*1}〃 樹下亮佑^{*3}〃 戸張涼太^{*5}〃 植木卓也^{*6}正会員 佐藤大樹^{*2}〃 Alex Shegay^{*4}〃 安永隼平^{*6}〃 森岡宙光^{*6}

1. はじめに

本報その1では、振幅依存性を有する間柱型粘弾性ダンパーの性能低下を考慮した超高層建物の地震応答予測手法、ダンパーのエネルギー吸収および性能低下率の予測手法について提案した。本報その2では、本報その1で提案した地震応答予測手法の精度検証を行う。

2. 建物モデルおよび入力地震動の概要

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 20 階建の事務所ビル¹⁴⁾とする。図1に軸組図と基準階伏図、表1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間柱型粘弾性ダンパーの設置位置である。X方向を解析対象とし、主架構は弾性とする。表2に主架構のみの固有周期 jT_f および刺激係数 $j\beta_f$ を示す。主架構のみの1次固有周期 jT_f は2.46秒であり、構造減衰は jT_f に対して減衰定数 $1\xi_f = 2\%$ となる剛性比例型とする。

図2に本報で用いる間柱型粘弾性ダンパーを示す。1つの粘弾性パネルは面積 $484 \times 484 \times 2 \text{ mm}^2$ 、厚さ25mmであり、2枚の粘弾性パネルが左右に連なっている。支持部材はH-1100 $\times$ 300 $\times$ 16 $\times$ 28とする¹⁵⁾。本報では、粘弾性ダンパーの初期温度は10, 20, 30 $^{\circ}\text{C}$ とする。また、応答予測および時刻歴応答解析には文献4), 5)の手法によるせん断モデル(図3)を用い、当該せん断モデルの妥当性は文献16)にて確認している。本報では擬似フレームと擬似ブレースは弾性とする。なお、時刻歴応答解析にはRESP-F3Tを用いる。

2.2 入力地震動の概要

図4に検討に用いる地震動の擬似速度応答スペクトル ρS_v ($\xi = 5\%$) およびエネルギースペクトル V_E ($\xi = 10\%$)を示す。入力地震動には、HACHINOHE 1968 EWを位相特性とし、コーナー周期0.64秒以降で ρS_v が80 cm/sで一定となる告示波(ART HACHI)と基整促波¹⁷⁾のOS1, OS2, SZ1, SZ2を用いる。図4より、 $1T_f$ 付近ではSZ1の

応答および入力エネルギーが最も大きくなり、それぞれレベル2相当の地震動(ART HACHI)の約2倍の値となる。

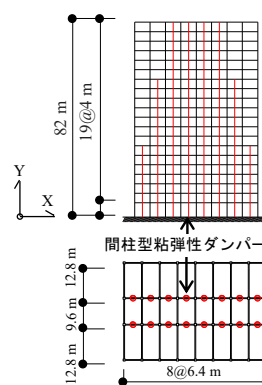


図1 軸組図および基準階伏図

表1 部材断面リスト

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

表2 主架構のみの固有周期
および刺激係数

Mode(j)	jT_f	$j\beta_f$
1st	2.46	1.35
2nd	0.909	-0.553
3rd	0.557	0.334

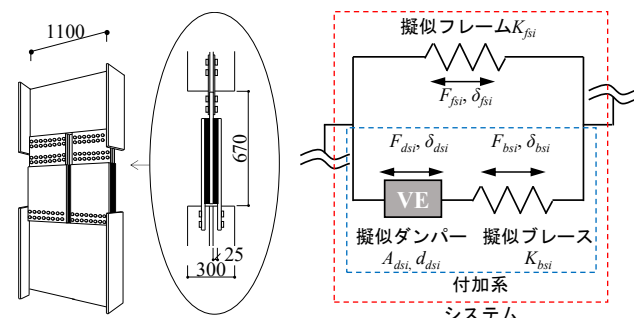
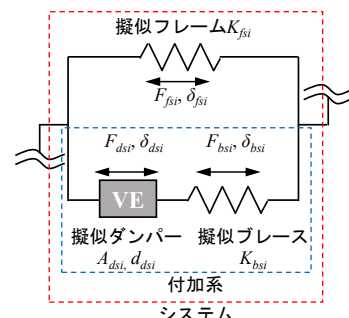
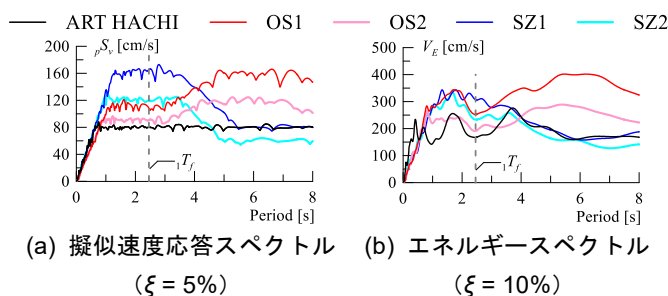
図2 間柱型粘弾性ダンパー
[単位: mm]

図3 せん断モデル



(a) 擬似速度応答スペクトル (b) エネルギースペクトル
($\xi = 5\%$) ($\xi = 10\%$)

図4 応答スペクトル

Seismic Response Prediction Method for High-rise Buildings Considering
Performance Degradation of Stud-type Viscoelastic Dampers with
Amplitude Dependencies

Part2 Accuracy verification of Seismic Response Prediction Method

NISHIUMI Hayato, SATO Daiki, KINOSHITA Ryosuke, Alex SHEGAY,
TOBARI Ryota, YASUNAGA Jumpei, UEKI Takuya, MORIOKA Hiromitsu

3. 予測手法の精度検証

3.1 減衰効果係数 D_h に用いる係数 κ の逆算法

本報その 1 に示したように、本報では減衰効果係数 D_h に用いる係数 κ は人工地震波の推奨値²⁾である $\kappa=75$ に加えて、時刻歴応答解析結果より逆算した κ を用いて本予測手法の精度を確認する。 κ の逆算法を以下に示す。

まず、擬似フレームのみの 1 次固有周期 $1T_f$ と 1 次の構造減衰 $1\xi_f$ および建物の 1 次等価減衰定数 $1\xi_{eq}$ の変位応答スペクトル $S_D(1T_f, 1\xi_f)$ および $S_D(1T_f, 1\xi_{eq})$ を用いて、次式で D_h を算出する。

$$D_h = \frac{S_D(1T_f, 1\xi_{eq})}{S_D(1T_f, 1\xi_f)} \quad (1)$$

ここで、 $1\xi_{eq}$ は文献 18) の手法を用いて時刻歴応答解析結果に基づき評価した値を用いる。

そして、式(1)より算出した D_h と $1\xi_f$ および $1\xi_{eq}$ を用いて κ を次式で算出する。

$$\kappa = \frac{1 - D_h^2}{1\xi_{eq} \cdot D_h^2 - 1\xi_f} \quad (2)$$

表 3 に時刻歴応答解析結果に基づき算出した $1\xi_{eq}$ と式(2)を用いて逆算した κ を示す。なお、 $1\xi_{eq}$ の評価には粘弾性ダンパーの性能低下を考慮しない時刻歴応答解析（低下なし）と低下なしの解析より得られた粘弾性ダンパーのエネル

表 3 時刻歴応答解析より算出した 1 次等価減衰定数 $1\xi_{eq}$ および逆算した κ

初期温度	入力地震動	$1\xi_{eq}$		κ	
		低下なし	低下あり	低下なし	低下あり
10°C	ART HACHI	7.09	6.95	33	32
	OS1	7.10	6.13	70	64
	OS2	7.23	6.82	47	46
	SZ1	6.75	5.21	83	56
	SZ2	6.99	5.96	38	34
20°C	ART HACHI	7.06	6.84	33	32
	OS1	6.84	6.06	69	64
	OS2	7.16	6.66	47	45
	SZ1	6.23	5.17	72	56
	SZ2	6.67	5.92	37	34
30°C	ART HACHI	6.65	6.35	31	30
	OS1	6.15	5.52	64	61
	OS2	6.54	6.02	45	43
	SZ1	5.44	4.77	59	51
	SZ2	5.98	5.42	34	32

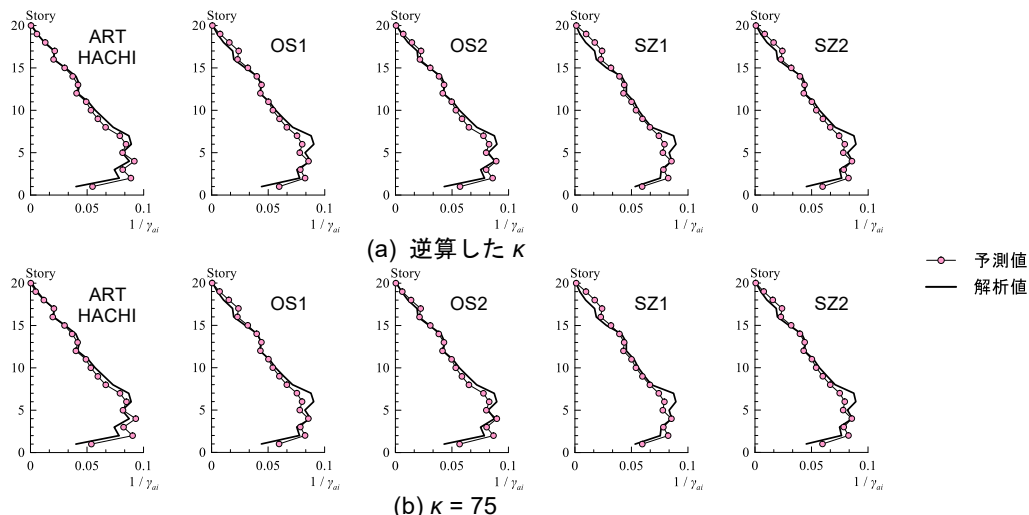


図 5 $1/\gamma_{ai}$ の高さ方向分布(粘弾性ダンパーの初期温度 10°C)

ギー吸収量から等価せん断弾性率 G_{eqi} および等価減衰定数 H_{eqi} の低下率 $G\lambda_{\Omega\theta i}$, $H\lambda_{\Omega i}$ を算出し (3.3 節 図 6, 解析値), G_{eqi} および H_{eqi} を初期値から低下させた解析（低下あり）の 2 種類を用いた。

3.2 エネルギー分布の予測精度

図 5(a), (b) に本予測手法および時刻歴応答解析（低下なし）より得られたダンパーが吸収するエネルギーの分布 $1/\gamma_{ai}$ の比較を示す。ここでは、例として最もダンパーの性能が低下する 10°C の結果のみを示す。図 5(a), (b) より、逆算した κ を用いた場合と $\kappa=75$ とした場合で比較すると、 $1/\gamma_{ai}$ の予測値の変化はわずかであり、どちらの κ を用いた場合においても本予測手法より得られた $1/\gamma_{ai}$ は時刻歴応答解析結果より得られた $1/\gamma_{ai}$ の分布形状を概ね再現できることがわかる。なお、他の初期温度においても同様の結果が得られることを確認している。このことから、バイリニアモデルへの置換を用いた $1/\gamma_{ai}$ の予測手法の妥当性が伺える。

3.3 性能低下率の予測精度

図 6(a), (b) に本予測手法および時刻歴応答解析より得られた $G\lambda_{\Omega\theta i}$, $H\lambda_{\Omega i}$ の高さ方向分布の比較を示す。なお、図 6 には図 5 と同様に最もダンパーの性能が低下する 10°C の結果のみを示す。また、図 7(a), (b) に $G\lambda_{\Omega\theta i}$, $H\lambda_{\Omega i}$ の予測精度（縦軸：予測値、横軸：解析値）を示す。まず図 6(a), (b) より、 $1/\gamma_{ai}$ と同様に、逆算した κ を用いた場合と $\kappa=75$ とした場合で比較すると、 $G\lambda_{\Omega\theta i}$, $H\lambda_{\Omega i}$ の予測値の変化はわずかであることがわかる。また、入力地震動によらず $G\lambda_{\Omega\theta i}$, $H\lambda_{\Omega i}$ の予測値は解析値と概ね同等かそれ以下であることが確認できる。これは、予測値は解析値より大きくダンパーの性能が低下することを意味し、安全側の評価である。そして図 7(a), (b) より、どちらの κ を用いた場合においても $G\lambda_{\Omega\theta i}$, $H\lambda_{\Omega i}$ とともに安全側に概ね 10% 程度の精度であることが確認でき、性能低下率は入力地震動、ダンパーの初期温度によらず安全側に予測できることがわかる。

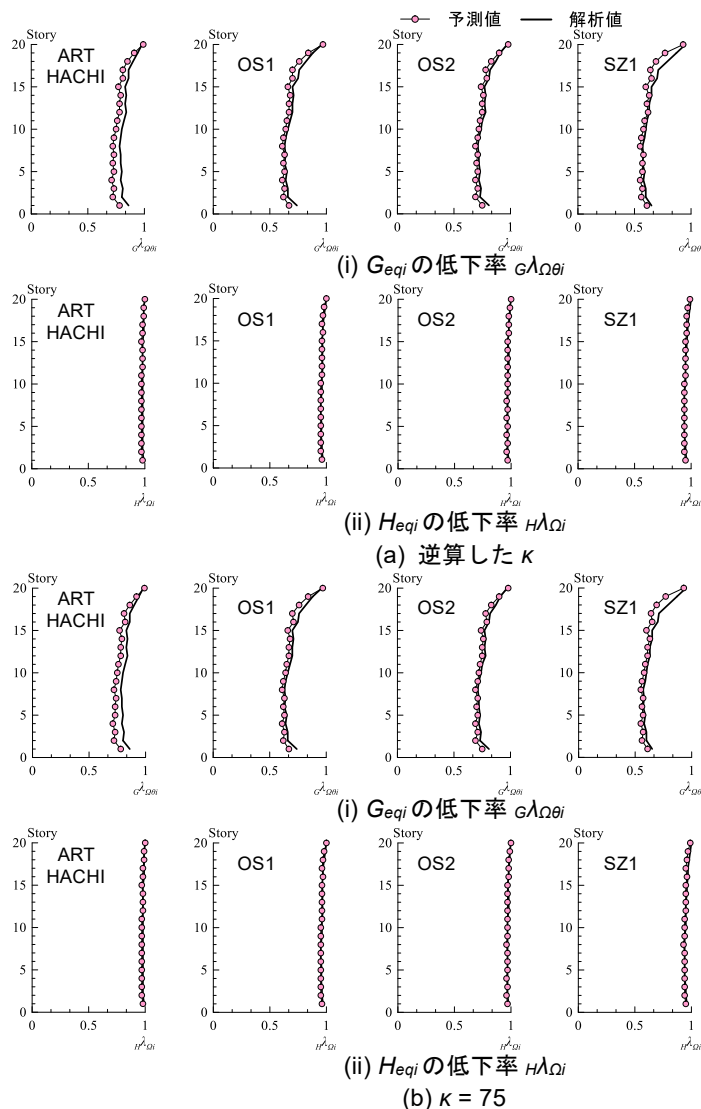


図6 性能低下率の高さ方向分布(10°C)

3.4 性能低下を考慮した建物応答の予測精度

図8(a), (b)に最大層間変形角の予測値と解析値の高さ方向分布の比較を示す。また、図9(a), (b)に最大層間変形角の予測精度(縦軸: 予測値, 横軸: 解析値)を示す。図8, 9(a), (b)の解析値は解析ステップごとにダンパーのエネルギー吸収量を基に $G_{\Lambda\Omega\theta i}$, $H_{\Lambda\Omega i}$ を算出し, G_{eqi} および H_{eqi} を低下させながら解析を行う, 実際の地震時挙動を模擬した解析(精算手法¹⁹⁾)の結果を示している。なお, 図8にはダンパーの性能低下による応答増大が最も大きい SZ1 入力時, 10°Cの結果のみを示している。まず図8(a), (b)より, 性能低下を考慮した場合の予測値は性能低下を考慮しない場合と比較して最大層間変形角が増大していることが確認できる。このことから, ダンパーの性能低下を建物応答の予測に反映できていることがわかる。また, 最大層間変形角の予測値は $1/\gamma_{ai}$ や $G_{\Lambda\Omega\theta i}$, $H_{\Lambda\Omega i}$ と同様に, κ の違いによる変化はわずかであることがわかる。そして, 図9(a), (b)より, 逆算した κ を用いた場合にはやや安全側の評価が増えるが, 最大層間変形角はどちらの κ を用いた場合においても概ね誤差 $\pm 20\%$ 程度で予測できることがわかる。

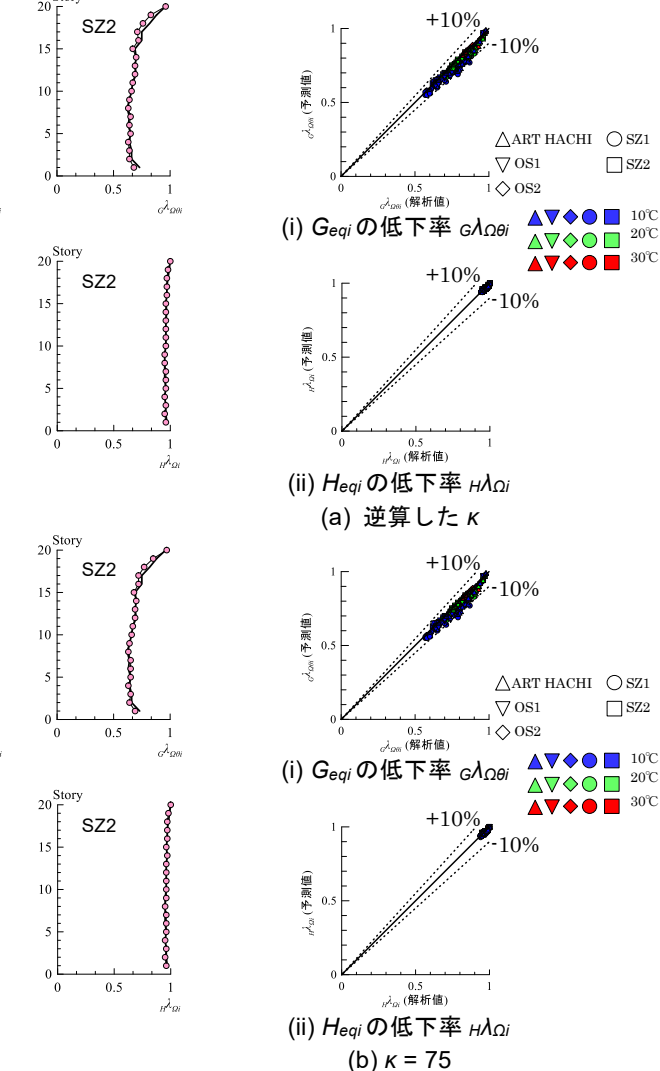


図7 性能低下率の予測精度

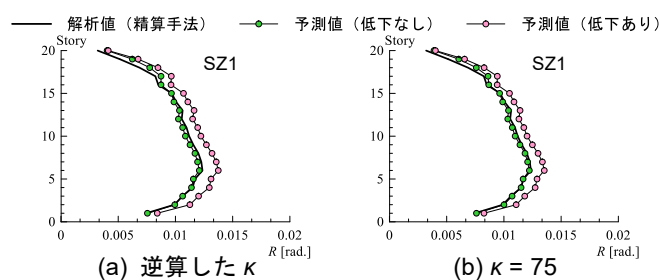


図8 最大層間変形角の高さ方向分布 (SZ1 入力時, 10°C)

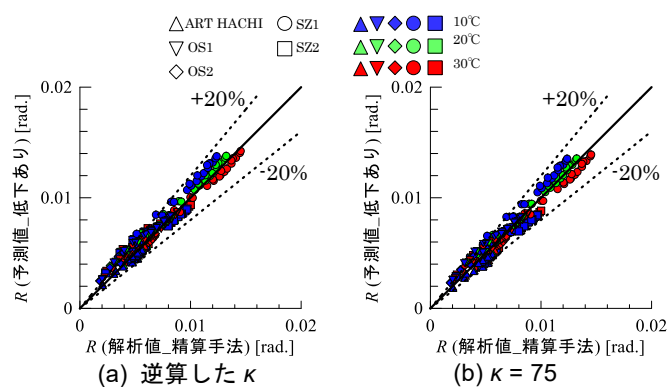


図9 最大層間変形角の予測精度

4. まとめ

本報では、振幅依存性を有する間柱型粘弾性ダンパーの繰り返し加振による性能低下を考慮した超高層建物の地震応答予測手法の提案を行った。また、本予測手法中で使用する減衰効果係数 D_i に用いる係数 κ を人工地震波の推奨値である $\kappa=75$ とした場合に加えて、時刻歴応答解析結果より逆算した κ を用いて本予測手法の精度を確認した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 本報で対象とした間柱型粘弾性ダンパーのような非線形粘弾性ダンパーを地震応答が等価となるようなバイリニアモデルへと置換することにより、非線形粘弾性ダンパーの性能低下率を予測する手法を示した。本予測手法の精度として、粘弾性ダンパーの等価せん断弾性率および等価減衰定数の低下率の予測値はどちらの κ を用いた場合においても、解析値に対して概ね誤差 10%程度であり、いずれも安全側の評価であった。
- (2) 間柱型粘弾性ダンパーの性能低下を考慮しない場合の応答予測手法¹⁾を性能低下を考慮できる応答予測手法へと拡張した。本予測手法の精度として、最大層間変形角の予測値は解析値に対して、どちらの κ を用いた場合においても入力地震動、粘弾性ダンパーの初期温度によらず概ね誤差 $\pm 20\%$ 程度であった。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 笠井和彦, 城台顕: 間柱型粘弾性ダンパーをもつ制振構造の動的特性と挙動およびそれらの簡易評価法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.558, pp.125-132, 2002.8
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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の予測と性能低下を考慮した最大変形の予測, 日本建築学会構造系論文集, Vol.88, No.806, pp.598-608, 2023.4
- 7) 秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂

出版, 1999.11

- 8) 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, 2017.8
- 9) 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 実大試験による性能評価-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-II, pp.595-596, 2017.8
- 10) 安永隼平, 樹下亮佑, 佐藤大樹, Alex Shegay, 戸張涼太, 植木卓也, 金城陽介: 間柱型粘弾性ダンパーの初期温度と性能低下を考慮した超高層建物の応答評価 -その3 高振動数載荷による長時間加振実験-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-II, pp.479-480, 2022.9
- 11) 栗林晃司, 佐藤大樹, 北村春幸, 山口路夫, 西本晃治: 実効変形を考慮した履歴減衰型制振部材を有する鋼構造建物のエネルギーの釣合に基づく応答予測法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.661, pp.543-552, 2011.3
- 12) 新井雄大, 佐藤大樹, Alex Shegay, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也, 金城陽介: 高減衰ゴム系積層ゴム支承を有する免震建物のバイリニアモデルへの置換 -免震層の応答に着目した検討-, 日本建築学会技術報告集, Vol.29, No.71, pp.68-73, 2023.2
- 13) 西海隼, 佐藤大樹, Alex Shegay, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也, 森岡宙光: 制振構造に用いる非線形粘弾性ダンパーのバイリニアモデルへの置換とエネルギー配分の予測, 第16回日本地震工学シンポジウム, 2023.11
- 14) 日本建築学会: 鋼構造制振設計指針第1版, 2014.11
- 15) 太木本仁志, 佐藤大樹, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也: 間柱型粘弾性ダンパーを組み込んだ超高層建物の長周期地震動に対する応答性状および性能評価実験, 構造工学論文集, Vol.66B, pp.345-352, 2020.3
- 16) 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
- 17) 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
- 18) 渡邊斐王羅, 西海隼, 佐藤大樹, Alex Shegay, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也, 森岡宙光: 間柱型粘弾性ダンパーの初期温度と性能低下を考慮した超高層建物の応答評価 -その6 時刻歴応答解析結果に基づく等価減衰定数の評価手法-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-II, pp.365-366, 2023.9
- 19) 佐藤大樹, 長山祥, 笠井和彦, 松田和浩: 長周期地震動時における粘性ダンパーの性能低下を考慮した制振構造建物の応答評価, 日本建築学会技術報告集, Vol.24, No.56, pp.59-62, 2018.2

*1 東京工業大学 大学院生

*2 東京工業大学 科学技術創成研究院 准教授・博士(工学)

*3 元東京工業大学 大学院生・修士(工学)

*4 オークランド大学 講師・Ph.D.

*5 JFEシビル株式会社

*6 JFEスチール株式会社

*Graduate Student, Tokyo Institute of Technology *1

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

*Former Grad. Student, Tokyo Institute of Technology, M.Eng. *3

*Lecturer, University of Auckland, Ph.D. *4

*JFE Civil Engineering & Construction Corporation *5

*JFE Steel Corporation *6