

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を設置した制振構造の地震応答予測手法 その2 予測法の精度検証
Title(English)	Seismic response prediction method for passive control structure installed stud-type VE damper with amplitude dependency Part2. Accuracy verification of prediction method
著者(和文)	樹下亮佑, 佐藤大樹, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也, 金城陽介
Authors(English)	Ryosuke Kinoshita, Daiki Sato, Ryota Tobar, 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. 309-312
Citation(English)	, , , pp. 309-312
発行日 / Pub. date	2022, 3

振幅依存性を有する間柱型粘弾性ダンパーを設置した制振構造の地震応答予測手法

その2 予測法の精度検証

構造—振動

間柱型粘弾性ダンパー 振幅依存性 等価線形化  
地震応答予測 長周期地震動 高次モード

正会員 ○ 樹下亮佑<sup>\*1</sup>  
〃 戸張涼太<sup>\*3</sup>  
〃 植木卓也<sup>\*4</sup>

正会員 佐藤大樹<sup>\*2</sup>  
〃 安永隼平<sup>\*4</sup>  
〃 金城陽介<sup>\*4</sup>

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を設置した制振構造建物の地震応答予測法の概要を示した。その際、層せん断力や層間変形のみならず、ダンパー変形をも正確に予測する手法であるDPMと、計算フローを簡略化し、DPMよりも簡易的に層せん断力、層間変形を予測する手法であるEPMの2種類の予測法を示した。本報その2では、その1で示したDPM、EPMを用いて予測した応答と時刻歴応答解析結果を比較し、予測精度を検証する。また、DPMに対するEPMの予測誤差についても述べる。

2. 検討対象建物および入力地震動概要

2.1 検討対象建物およびダンパー概要

検討対象建物は鉄骨造地上20階建て<sup>14)</sup>と50階建て<sup>15)</sup>の事務所ビルとする(それぞれ20 model, 50 model)。Fig.1に建物モデルの軸組図と基準階伏図、Table1に主架構の断面を示す。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。Table2に主架構のみの固有周期および刺激係数、Fig.2に主架構のみの刺激関数を示す。構造減衰は主架構のみの1次固有周期 $1T_f$ に対して減衰定数 $1\zeta_0 = 0.02$ となる剛性比例型とする。なお、時刻歴応答解析には構造計算プログラムであるRESP-D, RESP-F3Tを用いた。

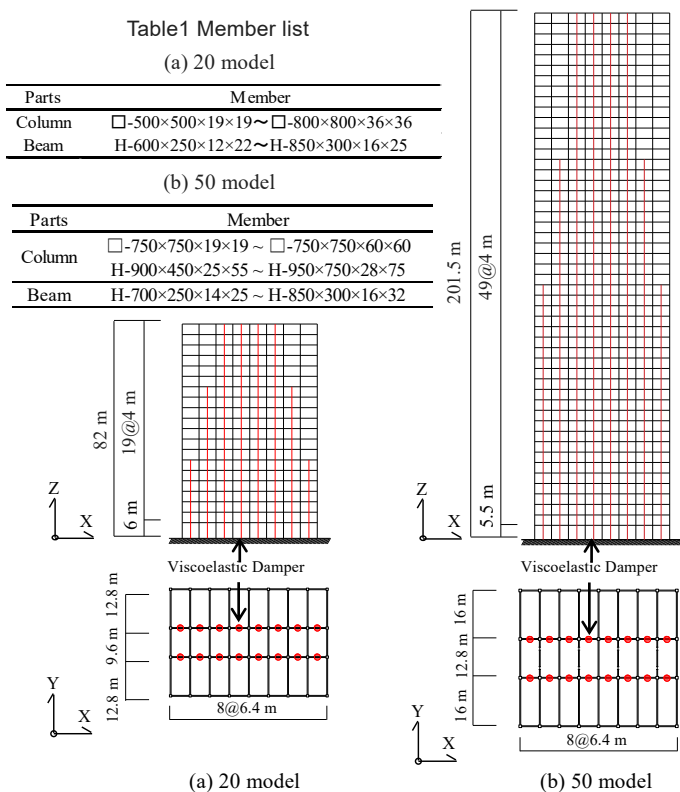


Fig.1 Elevation and plan

Table2 Natural period and modal participation factors

mode	20 model		50 model	
	$1T_f$	$\beta_f$	$1T_f$	$\beta_f$
First	2.46	1.35	6.85	1.33
Second	0.909	-0.553	2.46	-0.529
Third	0.557	0.334	1.49	0.338

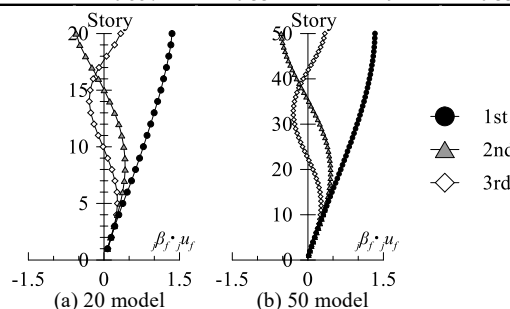


Fig.2 Modal participation function

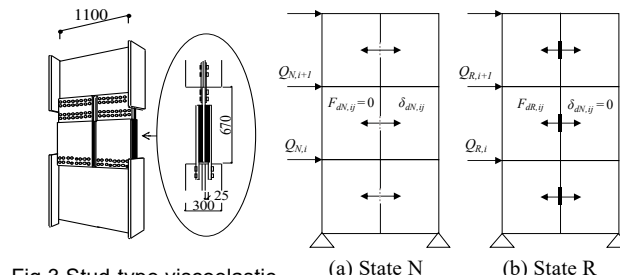


Fig.3 Stud-type viscoelastic damper [unit : mm]

Fig.4 State N and R

続いて、ダンパーの概要について示す。本報で用いる間柱型粘弾性ダンパーを Fig.3 に示す。1つの粘弾性体は面積  $484 \times 484 \text{ mm}^2$ 、厚さ  $25 \text{ mm}$  であり、2つの粘弾性パネルが連なっている。支持部材は H 形鋼からなり、寸法は  $H-1100 \times 300 \times 16 \times 28$  とする<sup>16)</sup>。

## 2.2 せん断モデルの作成手法概要<sup>7),8)</sup>

以下に、本報その1の Fig.5 に示すせん断モデルを作成する手順を示す。本報では、文献 7), 8) に示されている状態 N, R 解析 (Fig.4) より得られる骨組特性値をもとにせん断モデルを作成する。

はじめに、骨組特性値の算出方法を示す。状態 N, R 解析より、層剛性  $K_{Ni}$  および状態 N 時の粘弾性ダンパーの実効変形比  $\alpha_{Nik}$ 、粘弾性ダンパー設置箇所の架構剛性  $K_{dRik}$  を次式で算出する ( $K_{Ni}$ ,  $\alpha_{Nik}$ ,  $K_{dRik}$  をまとめた総称を骨組特性値)。なお、本報では文献 7), 8) に倣い、状態 N, R 解析時の外力分布は  $A_i$  分布とする。

$$K_{Ni} = Q_{Ni} / \delta_{Ni}, \quad \alpha_{Nik} = \delta_{dik} / \delta_{Ni}, \quad K_{dRik} = F_{dRik} / \delta_{Ri} \quad (1-3)$$

ここに、 $Q$ ,  $\delta$ : 層せん断力, 層間変形,  $F_d$ ,  $\delta_d$ : ダンパー設置箇所の負担荷重の水平成分, 相対変形の水平成分, 右下の添え字  $N$  および  $R$  は状態 N および状態 R の計算値,  $ik$  は  $i$  層  $k$  番目のダンパー設置箇所の諸元, 計算値であることを示す。これらの骨組特性値を用いて、せん断モデルの諸元を次式で算出する。

$$K_{fsi} = K_{Ni}, \quad K_{bsi} = \sum_{k=1}^{N_{di}} \alpha_{Nik} \cdot K_{dRik} \quad (4,5)$$

$$A_{dsi} = \sum_{k=1}^{N_{di}} \alpha_{Nik} \cdot A_{dik}, \quad d_{dsi} = \sum_{k=1}^{N_{di}} d_{dik} / (\alpha_{Nik} \cdot N_{di}) \quad (6,7)$$

ここに、 $A_d$ ,  $d_d$ : 粘弾性ダンパーのせん断面積, 厚さ,  $N_d$ : ダンパー設置数, 右下の添え字  $s$  はせん断モデルの諸元, 計算値である。

## 2.3 入力地震動概要

入力地震動には、1968 年の十勝沖地震における HACHINOHE EW 成分を用いた模擬波 (以降、この模擬波を ART HACHI と呼ぶ) と基整促波である OS1, SZ1<sup>17)</sup> の 3 波を採用する。Fig.5 に擬似速度応答スペクトル  $pS_v$  ( $\zeta = 5\%$ )、加速度応答スペクトル  $S_a$  ( $\zeta = 5\%$ ) を示す。また、主架構のみの 1 次, 2 次固有周期を併せて示す。Fig.5 より、50 model の 1 次固有周期では OS1 の応答が最も大きくなり、20 model の 1 次, 50 model の 2 次固有周期では、SZ1 の応答が最も大きくなる。また、それらはそれぞれレベル 2 相当の地震動 (ART HACHI) の約 2 倍の値となる。

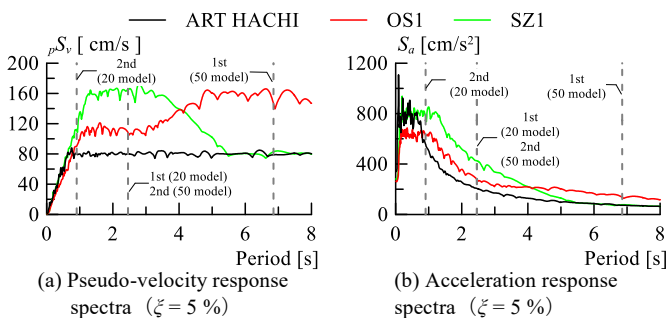


Fig.5 Earthquake response spectra

## 3. 時刻歴応答解析結果と予測結果の比較

応答予測結果と時刻歴応答解析結果を比較して、応答予測の精度を検証する。本報その1に示すように、等価せん断弾性率変動係数  $g_{lp}$ 、等価減衰定数変動係数  $H_{lp}$  を変化させることで、粘弾性ダンパーの性能変動を考慮した応答値が得られるが、本報では  $g_{lp}$ ,  $H_{lp}$  とともに 1.0 とし、粘弾性ダンパーの性能変動は考慮しない。また、粘弾性ダンパーの初期温度は 10, 20, 30°C とする。

Fig.6 に実効変形比  $\alpha_e$ 、Fig.7 に層せん断力係数  $C$ 、Fig.8 に層間変形角  $R$  の高さ方向分布を示す。粘弾性ダンパーの初期温度は 20°C とし、時刻歴応答解析結果は部材構成モデルの結果 (図中、凡例 THA (Member)) とせん断モデルの結果 (図中、凡例 THA (Shear))、応答予測結果は、DPM を用いた結果 (図中、凡例 Predict (DPM))、EPM を用いた結果 (図中、凡例 Predict (EPM)) を示す。また、非制振時の応答として、擬似フレームのみのせん断モデル (以降、フレームモデル) の時刻歴応答解析結果 (図中、凡例 THA (Frame)) も併せて示す。ここで、実効変形比  $\alpha_e$  を次式で定義する。

$$\alpha_{ei} = \frac{1}{N_{di}} \sum_{k=1}^{N_{di}} \frac{\delta_{dik}}{\delta_{si}} = \frac{1}{N_{di}} \sum_{k=1}^{N_{di}} \frac{\alpha_{Nik} \cdot \delta_{dsi}}{\delta_{si}} = \frac{1}{N_{di}} \sum_{k=1}^{N_{di}} \frac{\alpha_{Nik} \cdot \gamma_{dsi} \cdot d_{dsi}}{\delta_{si}} \quad (8)$$

Fig.6~8 より、50model の ART HACHI 入力時の実効変形比を除いて、部材構成モデルとせん断モデルの応答が概ね一致しているため、以降はせん断モデルの応答と予測結果を比較する。Fig.6 より、実効変形比のせん断モデルの応答と予測結果を比較すると、DPM は概ね精度良く時刻歴応答解析結果を予測できているが、EPM は時刻歴応答解析結果と乖離している。これは、本報その1に示すように、収斂初期の擬似ダンパーのせん断ひずみ  $\gamma_{dsi}^{10}$  を主架構のみの応答層間変位  $\delta_{si}$  をもとに設定していること (本報そ

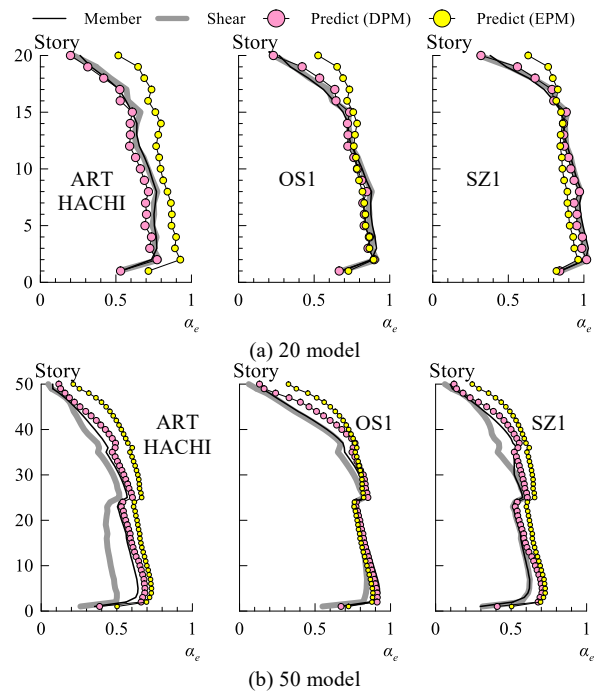
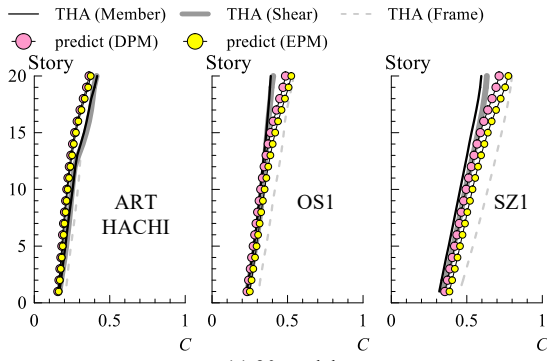
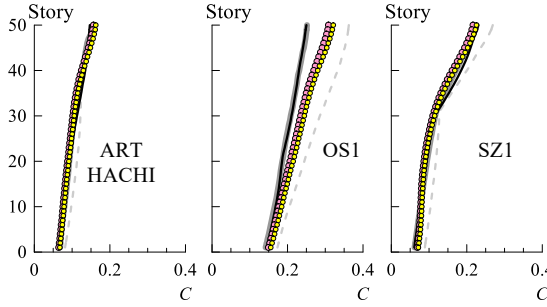


Fig.6 Effective deformation ratio (20°C)

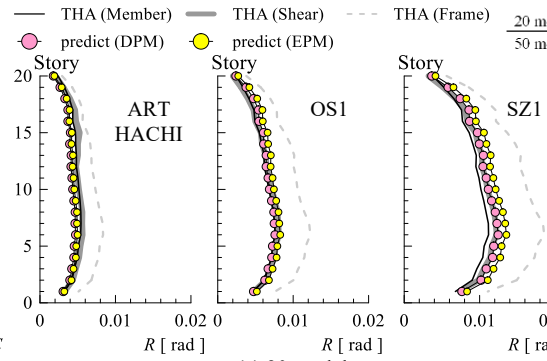


(a) 20 model

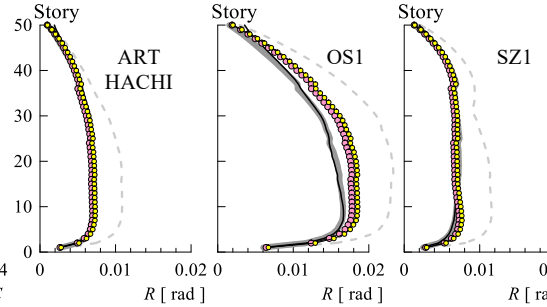


(b) 50 model

Fig.7 Shear force coefficient (20°C)

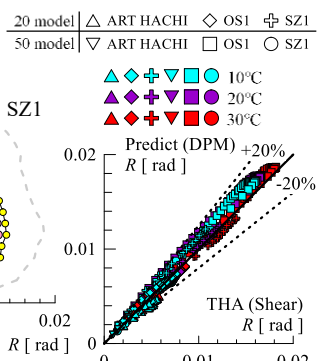


(a) 20 model



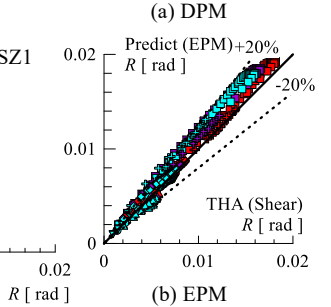
(b) 50 model

Fig.8 Drift angle (20°C)



(a) DPM

Fig.9 Comparison of shear model and predict



(b) EPM

Table3  ${}_1\xi_{eq}$ ,  $D_h({}_1\xi_{eq})$  and  ${}_1T_{eq}$  (DPM(EPM)) (20 model)

(a) 10°C

	ART HACHI	OS1	SZ1
${}_1\xi_{eq}$	0.054 (0.053)	0.054 (0.048)	0.051 (0.041)
$D_h({}_1\xi_{eq})$	0.70 (0.71)	0.70 (0.73)	0.72 (0.79)
$T_{eq}$	2.12 s (2.15 s)	2.18 s (2.21 s)	2.26 s (2.27 s)

(b) 20°C

	ART HACHI	OS1	SZ1
${}_1\xi_{eq}$	0.054 (0.050)	0.052 (0.043)	0.048 (0.039)
$D_h({}_1\xi_{eq})$	0.70 (0.72)	0.71 (0.77)	0.74 (0.80)
$T_{eq}$	2.16 s (2.18 s)	2.22 s (2.23 s)	2.29 s (2.29 s)

(c) 30°C

	ART HACHI	OS1	SZ1
${}_1\xi_{eq}$	0.052 (0.045)	0.048 (0.039)	0.043 (0.036)
$D_h({}_1\xi_{eq})$	0.72 (0.75)	0.74 (0.80)	0.77 (0.83)
$T_{eq}$	2.21 s (2.22 s)	2.27 s (2.28 s)	2.33 s (2.33 s)

Table4  ${}_1\xi_{eq}$ ,  $D_h({}_1\xi_{eq})$  and  ${}_1T_{eq}$  (DPM(EPM)) (50 model)

(a) 10°C

	ART HACHI	OS1	SZ1
${}_1\xi_{eq}$	0.048 (0.047)	0.040 (0.035)	0.047 (0.044)
$D_h({}_1\xi_{eq})$	0.74 (0.74)	0.79 (0.83)	0.74 (0.77)
$T_{eq}$	6.11 s (6.18 s)	6.44 s (6.44 s)	6.07 s (6.11 s)

(b) 20°C

	ART HACHI	OS1	SZ1
${}_1\xi_{eq}$	0.048 (0.042)	0.037 (0.033)	0.047 (0.042)
$D_h({}_1\xi_{eq})$	0.74 (0.77)	0.81 (0.85)	0.74 (0.78)
$T_{eq}$	6.20 s (6.23 s)	6.50 s (6.50 s)	6.16 s (6.19 s)

(c) 30°C

	ART HACHI	OS1	SZ1
${}_1\xi_{eq}$	0.044 (0.039)	0.033 (0.031)	0.044 (0.038)
$D_h({}_1\xi_{eq})$	0.76 (0.80)	0.84 (0.87)	0.76 (0.80)
$T_{eq}$	6.32 s (6.34 s)	6.56 s (6.57 s)	6.27 s (6.29 s)

の1, 式(41)~(43)), 収斂計算において,  $\gamma_{dsi}^{(0)}$ を  $D_h({}_1\xi_{eq}^{(n)}) \cdot {}_1T_{eq}^{(n)}/{}_1T_f$ を用いて全層で一定の割合で変化させていること (本報その1, 式(45)) から, 最終的に得られた層間変位  $\delta_{si}^{[q]}$ と擬似ダンパーのせん断ひずみ  $\gamma_{dsi}^{[q]}$ が対応していないことに起因する。一方で, Fig.7, 8より, 層せん断力係数, 層間変形角は, 入力地震動, 建物モデルによらず, せん断モデルの時刻歴応答解析結果と DPM, EPMの予測結果が概ね一致する。また, DPMの予測値に対するEPMの予測値の比率は, 層せん断力係数, 層間変形角ともに, 20 modelで1.03~1.08, 50 modelで1.04~1.06程度となる。これは, 実効変形比の誤差が1次等価減衰定数  ${}_1\xi_{eq}$ および1次等価周期  ${}_1T_{eq}$ に及ぼす影響が小さく, Table3, 4に示すように, DPMとEPMの予測の過程で算出された減衰効果係数  $D_h({}_1\xi_{eq})$ , 1次等価周期  ${}_1T_{eq}$ が, 概ね同等の値となるか

らである。1次等価減衰定数  ${}_1\xi_{eq}$ の値は, 地震波, 建物モデルによってはDPMとEPMで誤差が大きくなり, 本報の検討範囲では  ${}_1\xi_{eq}$ のDPMに対するEPMの誤差は最大で20%程度となるが,  $D_h({}_1\xi_{eq})$ のDPMに対するEPMの誤差は最大で10%程度となり, 層間変形角等の予測値に及ぼす影響は比較的小さくなる。また, Fig.7, 8の応答およびTable3, 4の減衰効果係数  $D_h({}_1\xi_{eq})$ より, EPMはDPMと比較して応答を安全側に評価する傾向がある。

次に, Fig.9に層間変形角のせん断モデルの時刻歴応答解析結果と予測結果の比較を示す。図中横軸をせん断モデルの応答値, 縦軸を予測値とし, 時刻歴応答解析結果に対する予測値の誤差が $\pm 20\%$ となる線も併せて示す。Fig.9より, DPM, EPMともに, 層間変形角の予測結果は, 時刻歴応答解析結果に対して概ね誤差 $\pm 20\%$ 以内で予測できてお

り、両予測手法の予測精度は良好である。

以上より、DPM は層間変形角等の応答のみならず、ダンパー変形（実効変形比）も精度良く予測できる反面、計算フローが煩雑であり、簡易的な予測手法とは言い難い（本報その1）が、層間変形角等の応答のみを予測する場合は、計算フローを簡略化（本報その1）した EPM でも、DPM と概ね同等の精度で、かつ DPM よりも簡易的に応答を予測できる。

#### 4. まとめ

本報その2では、その1で示した手法を用いて予測した応答と時刻歴応答解析結果を比較し、本手法の予測精度を検証した。以下に本報その2のまとめを示す。

- 1) 擬似ダンパーのせん断ひずみとベースシアに対して2重の収斂計算を行う応答予測法である DPM（本報その1）を用いた場合、層せん断力係数、層間変形角のみならず、ダンパー変形（実効変形比）も、時刻歴応答解析結果を精度良く予測できた。また、建物モデル、入力地震動によらず予測精度は良好であり、時刻歴応答解析結果に対する DPM の予測値の誤差は、概ね±20%以内であった。
- 2) DPM に対して、計算フローを簡略化し、せん断ひずみに対してのみ収斂計算を行う応答予測法である EPM（本報その1）を用いた場合、実効変形比の予測結果は時刻歴応答解析結果と乖離するが、層せん断力係数、層間変形角に関しては、DPM と概ね同等の精度で時刻歴応答解析結果を予測できた。これは、実効変形比の誤差が1次等価減衰定数  $i_{\xi eq}$  および1次等価周期  $i_{T_{eq}}$  に及ぼす影響が小さく、予測の過程で算出された減衰効果係数  $D_h(i_{\xi eq})$  と1次等価周期  $i_{T_{eq}}$  の値が、DPM と EPM で概ね一致するからである。また、EPM に関しても、建物モデル、入力地震動によらず予測精度は良好であり、時刻歴応答解析結果に対する EPM の予測値の誤差は、概ね±20%以内であった。
- 3) DPM は層間変形角等の応答のみならず、実効変形比も精度良く予測できる反面、計算フローが煩雑であり、簡易的な予測手法とは言い難い（本報その1）が、層間変形角等の応答のみを予測する場合は、計算フローを簡略化（本報その1）した EPM でも、DPM と概ね同等の精度で、かつ DPM よりも簡易的に応答を予測できる。

#### 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。本研究の一部は、JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム（JPMJOP1723）によるものです。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：長周期地震動と超高層建物の対策案—専門家として知っておきたいこと—, 2013.10
- 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) 竹内徹, 市川康, 中島秀雄, 笠井和彦：ダンパーが不均等配置された多層パッシブ制振構造の応答予測, 日本建築学会構造系論文集, No.583, pp.115-122, 2004.9
- 4) 石井正人, 和田章：速度依存型ダンパーを設置した鋼構造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, No.639, pp.803-812, 2009.5
- 5) 大木洋司, 笠井和彦：振幅依存性をもつイソブチレン・スチレン系粘弾性ダンパーの等価線形化と制振構造設計法への応用, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.653, pp.1209-1216, 2010.7
- 6) 鈴木公平, 中尾貞治, 津之下睦, 高島英幸：非線形型粘弾性ダンパーを有する間柱型制振架構の減衰性能評価と動的挙動, 日本建築学会構造系論文集, Vol.83, No.745, pp.373-383, 2018.3
- 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) 加藤秀章, 森隆浩, 室田伸夫, 石井建, 菊地優：高減衰積層ゴムの変形履歴積分型復元力モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.667, pp.1721-1728, 2011.9
- 10) 森隆浩, 櫻井祐, 加藤享二, 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1, その2）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.595-598, 2017.8
- 11) 櫻井祐, 森隆浩, 加藤享二, 戸張涼太, 金城陽介, 植木卓也：高減衰ゴムを用いた間柱型粘弾性ダンパー～その5 性能変動を考慮できる履歴モデル～, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.271-272, 2018.9
- 12) 笠井和彦, 伊藤浩資, 渡辺厚：等価線形化手法による一質点弾塑性構造の最大応答予測法, 日本建築学会構造系論文集, No.571, pp.53-62, 2003.9
- 13) 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, B-2, pp.697-698, 2021.9
- 14) 日本建築学会：鋼構造制振設計指針第1版, 2014.11
- 15) 木村暢志, 北村春幸, 佐藤利昭, 木村雄一, 青野英志, 山本優：東海・東南海・南海単独地震の応答に基づく三連動地震による超高層建物の最大値と累積値の応答評価法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.712, pp.873-883, 2015.6
- 16) 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
- 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動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

\*1 学生会員 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 JFE シビル株式会社

\*4 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

JFE Civil Engineering & Construction Corporation \*3

JFE Steel Corporation \*4