

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	長周期地震動に対する間柱型粘弾性ダンパーの動的特性および超高層制振建物の簡易応答評価法
Title(English)	Simplified Response Evaluation of High-Rise Building with Stud-Type VE Damper considering its Dynamic Performance Decrement under longperiod ground motion
著者(和文)	太木本仁志, 佐藤大樹, 戸張涼太, 吉永光寿, 安永隼平, 金城陽介
Authors(English)	Hitoshi Takimoto, Daiki Sato, Ryota Tobari, Mitsutoshi Yoshinaga, Jumpei Yasunaga, Yosuke Kaneshiro
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 221-224
Citation(English)	, , , pp. 221-224
発行日 / Pub. date	2020, 3

長周期地震動に対する間柱型粘弾性ダンパーの動的特性

および超高層制振建物の簡易応答評価法

構造—振動

制振構造 間柱型 粘弾性ダンパー

超高層建物 長周期地震動

正会員 ○ 太木本仁志^{*1}

正会員 戸張 涼太^{*3}

正会員 安永 隼平^{*4}

正会員 佐藤 大樹^{*2}

正会員 吉永 光寿^{*3}

正会員 金城 陽介^{*4}

1. はじめに

近年、長周期地震動への関心が高まっている。長周期地震動は継続時間の長いゆっくりとした大きな揺れで遠方まで伝わる性質を持つ。長周期地震動が発生した際、長い固有周期を持つ超高層建物は共振現象により、大きな被害を受ける可能性がある。その対策として、制振部材（ダンパー）を建物に設置し、主架構の損傷を抑える制振構造の需要が高まっている。本研究で対象とする間柱型粘弾性ダンパーの特徴として、粘弾性ダンパーは微小な変形にも効果を発揮し、小地震から大地震まで幅広く対応できる。また、間柱型は配置の自由度が高く、ブレース型などに比べ空間を有効に利用することができる。しかし、一般的に粘弾性ダンパーは長時間の繰返し加振により、その特性が変化することが懸念されている。

本報では、長時間正弦波加振実験より、ダンパーのエネルギー密度で動的特性の変化を整理し、動的特性の変化を考慮した間柱型粘弾性ダンパーを組み込んだ超高層建物の応答評価法を示す。

2. 長時間正弦波加振実験概要

2.1 载荷条件

Table1 に長時間正弦波加振実験の载荷条件を示す²⁾。本報では試験体 A~C を用いて行われた $f=0.1, 0.33, 2\text{ Hz}$, $\gamma_d = 50\%, 100\%, 200\%, 300\%$ の各組み合わせの計 11 ケースの結果を用いる。実験の詳細については文献 2) を参照されたい。

Table1 Experiment parameters

Specimen	Frequency [Hz]	Strain [%]	Cycles [-]	Total Times [s]
A	0.1	50	200	2010
		100	100	1011.5
		200	50	510.4
		300	34	353.1
B	0.33	50	200	617.9
		100	100	310.4
		200	50	158.5
		300	34	112.4
C	2	50	200	105.3
		100	40	77.2
		200	10	73.2

2.2 ダンパー特性値の算出方法

ダンパーのひずみ γ_d はパネルのせん断変形 u_d をパネル厚さ d で除して求める (式(1))。ダンパーのエネルギー吸収量 w_d をダンパーの体積 V で除したものをエネルギー密度 Ω と呼び、以下のように定義する (式(2))³⁾。

$$\gamma_d = \frac{u_d}{d}, \quad \Omega = \frac{w_d}{V} \quad (1), (2)$$

1 サイクルごとのダンパーのせん断応力度の最大値 $\tau_{d,max}$ およびエネルギー密度 Ω を式(3), (4)より求める。なお、エネルギー密度に半波 1 および各载荷条件の最後の 1 サイクルは含まない。

$$\tau_{d,max}^{[n]} = \frac{|\tau_{d,max}^{(2n)}| + |\tau_{d,max}^{(2n+1)}|}{2} \quad (3)$$

$$\Omega^{[n]} = \sum_{i=1}^{N_D} \frac{(\tau_d^{(i)} + \tau_d^{(i+1)}) \cdot (\gamma_d^{(i+1)} - \gamma_d^{(i)})}{2} \quad (4)$$

N_D は 1 サイクルのデータ数である。 n サイクルのダンパーのせん断応力度の最大値は Fig.1 のように計測直後の 1 つ目の半波を除いた半波 $2n$ と半波 $2n+1$ の絶対値の平均値より算出している (ただし $n \geq 1$ とする)。また、エネルギー密度は 1 サイクルごとのダンパーのせん断応力度 τ_d -ひずみ γ_d 関係の履歴の面積より算出している。本報では、等価せん断弾性率 G_{eq} 、等価減衰定数 H_{eq} をダンパーの特性値と呼び、それぞれ式(5), (6)より求める。なお、() はステップ、 $\langle \rangle$ は半波、[] はサイクルを意味する。

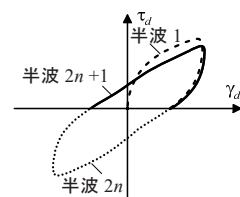


Fig.1 Definition of half wave

$$G_{eq}^{[n]} = \frac{|\tau_{d,max}^{(2n)}| + |\tau_{d,max}^{(2n+1)}|}{|\gamma_{d,max}^{(2n)}| + |\gamma_{d,max}^{(2n+1)}|} \quad (5)$$

$$H_{eq}^{[n]} = \frac{\Omega^{[n]}}{2\pi \cdot G_{eq}^{[n]} \left(\frac{|\gamma_{d,max}^{(2n)}| + |\gamma_{d,max}^{(2n+1)}|}{2} \right)^2} \quad (6)$$

2.3 実験結果

長時間正弦波加振実験の結果からダンパー特性値の低下の傾向を確認する。Fig.2 に $f=0.1, 0.33, 2 \text{ Hz}$, $\gamma_d=50\%, 100\%, 200\%, 300\%$ の各組み合わせの計 11 ケースの Ω に対する $g\lambda_\Omega, h\lambda_\Omega$ を示す。Fig.2 より、 Ω に対する $g\lambda_\Omega, h\lambda_\Omega$ はばらつきがある。そのため、全ケースの中央付近の値となる場合(中央式)および最下限の値となる場合(下限式)で近似式を作成する。

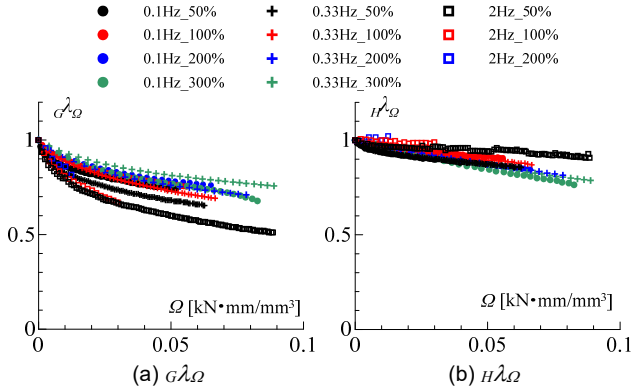


Fig.2 Normalized dynamic properties vs. energy density

3. 近似式の作成

3.1 作成手順

実験から求まる G_{eq}, H_{eq} の低下率をそれぞれ $g\lambda_\Omega^T, h\lambda_\Omega^T$, 近似式から求まる G_{eq}, H_{eq} の低下率をそれぞれ $g\lambda_\Omega^P, h\lambda_\Omega^P$ とする。また、 $g\lambda_\Omega^P, h\lambda_\Omega^P$ は式(7), (8)で表される b_G, b_H に収束する近似式とする。

$$g\lambda_\Omega^P = \frac{a_G}{\Omega^{c_G} + d_G} + b_G, \quad h\lambda_\Omega^P = \frac{a_H}{\Omega^{c_H} + d_H} + b_H \quad (7), (8)$$

式(7), (8)の $a_G \sim d_G, a_H \sim d_H$ は実験の G_{eq}, H_{eq} の低下の傾向に合うように決定する。近似値 $g\lambda_\Omega^P, h\lambda_\Omega^P$ について実験値 $g\lambda_\Omega^T, h\lambda_\Omega^T$ に対する相対誤差の 2 乗和を R_G, R_H とし(式(9), (10)), R_G, R_H が最小となる $a_G \sim d_G, a_H \sim d_H$ を求める⁴⁾。

$$R_G = \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{g\lambda_\Omega^{P(i)}}{g\lambda_\Omega^{T(i)}} - 1 \right\}^2, \quad R_H = \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{h\lambda_\Omega^{P(i)}}{h\lambda_\Omega^{T(i)}} - 1 \right\}^2 \quad (9), (10)$$

3.2 中央式

中央式は長時間正弦波加振実験における $f=0.1, 0.33, 2 \text{ Hz}$, $\gamma_d=50\%, 100\%, 200\%, 300\%$ の各組み合わせ計 11 ケースから求める。式(9), (10)より、 R_G, R_H が最小となる中央式は式(11), (12)で表される。

$$g\lambda_\Omega^P = \frac{0.002}{\Omega^{1.323} + 0.005} + 0.6 \quad (11)$$

$$h\lambda_\Omega^P = \frac{0.0017}{\Omega^{1.2062} + 0.0115} + 0.85 \quad (12)$$

Fig.3 に式(11), (12)で表される近似式(中央式)および実験結果より計 11 ケースの Ω に対する $g\lambda_\Omega, h\lambda_\Omega$ を示す。Fig.3 より、近似式(中央式)は実験結果の中央付近の値となることが分かる。

3.3 下限式

下限式は長時間正弦波加振実験で最も低下率の大きいケースから求める。 $g\lambda_\Omega$ は $f=2 \text{ Hz}$, $\gamma_d=50\%$ のケース、 $h\lambda_\Omega$ は $\Omega=0.08 \text{ kN}\cdot\text{mm}/\text{mm}^3$ までは $f=0.1 \text{ Hz}$, $\gamma_d=300\%$ のケース、それ以降は $f=0.33 \text{ Hz}$, $\gamma_d=50\%$ のケースを用いる。式(9), (10)より、 R_G, R_H が最小となる $g\lambda_\Omega^P, h\lambda_\Omega^P$ は式(13), (14)で表される。

$$g\lambda_\Omega^P = \frac{0.018}{\Omega^{0.922} + 0.029} + 0.4 \quad (13)$$

$$h\lambda_\Omega^P = \frac{0.017}{\Omega^{1.06} + 0.05} + 0.65 \quad (14)$$

Fig.3 に式(13), (14)で表される近似式(下限式)および実験結果より計 11 ケースの Ω に対する $g\lambda_\Omega, h\lambda_\Omega$ を示す。Fig.3 より、近似式(中央式)は実験結果の下限値と良く対応していることが分かる。

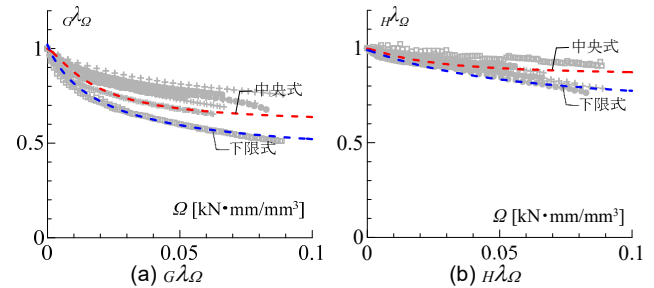


Fig.3 Normalized dynamic properties vs. energy density

4. ダンパーの特性変化を考慮した時刻歴応答解析

4.1 建物モデル概要

検討対象建物は、鉄骨造 50 階建の事務所ビルとする⁵⁾。⁶⁾ Fig.4 に検討建物モデルの軸組図、基準階伏図、Table2 に架構部材の主要断面を示す。階高は 1 階 5.5 m, 2~50 階 4 m とする。軸組図の点線、基準階伏図の丸は粘弾性ダンパーの設置位置を示す。主架構のみを Frame model, ダンパーを組み込んだモデルを D2 と呼び、640 基のダンパーを設置している。D2 のダンパー量 α_{d1} は 0.6% となる。構造減衰は主架構のみのモデル (Frame model) の 1 次固有周期に対して減衰定数 $\zeta = 0.02$ となる初期剛性比例型とする。本報では X 方向を解析対象とする。Frame model の総重量 W は 806039 kN, 1 次固有周期は 7.38 s である。

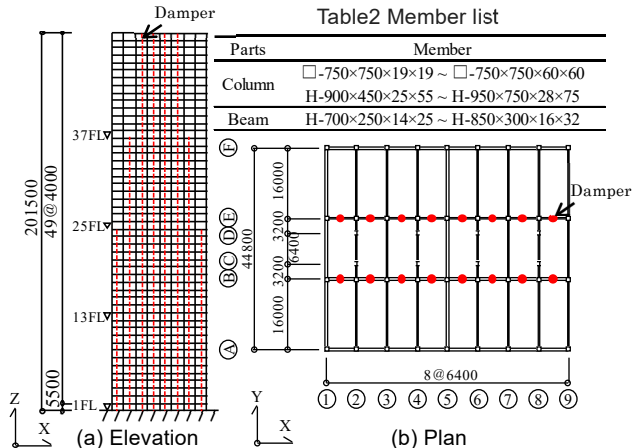


Fig.4 Elevation and Plan views [unit : mm]

4.2 間柱型粘弾性ダンパー概要

本報で用いるダンパーを Fig.5 に示す。支持柱および粘弾性パネルの諸元を Table3 に示す。1つの粘弾性体のサイズは $A_s = 484 \times 484 \text{ mm}^2$ 、厚さ $d = 25 \text{ mm}$ で2つの粘弾性パネルが重なっている。上下の支持部材は H 形鋼からなり寸法は H-1100×300×16×28 とする。ダンパーの解析モデルは文献 7) に示すものを用いた。なお本報ではダンパーの重量もモデル化している。

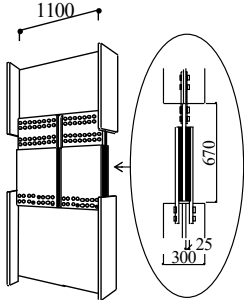


Table3 Damper characteristics

Type	Double
Cross-sectional area A_s [mm ²]	937,024
Rubber thickness d [mm]	25
Cross section of support member [mm]	H-1100×300×16×28

Fig.5 Viscoelastic Damper [unit: mm]

4.3 入力地震動概要

入力地震動には海溝型地震に分類される 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 OS2, OS1 の 3 波を採用する⁸⁾。Fig.6 に擬似速度応答スペクトル pS_v ($\zeta = 5\%$)、エネルギースペクトル V_E ($\zeta = 10\%$) をそれぞれ示す。主架構の 1 次固有周期 (7.38s) 付近では、OS2 が ART HACHI に対し、 pS_v は約 1.3 倍、 V_E は約 1.4 倍となる。また、OS1 が ART HACHI に対し pS_v 、 V_E は約 2 倍となり、いずれもレベル 2 地震動 (ART HACHI) より大きな値を示す地震動であることが分かる。

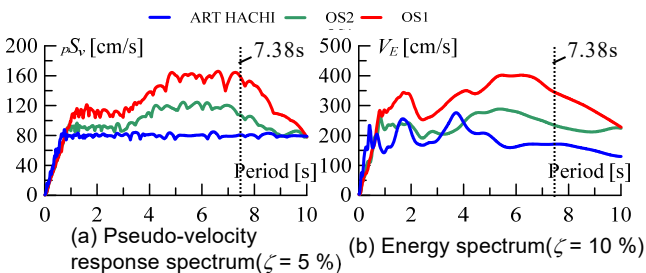


Fig.6 Earthquake spectra

4.4 解析条件

解析は主架構が弾性とする。ダンパーの特性が変化しない解析（特性変化なし）と特性変化なしの地震終了時の Ω (Table4) を基に近似式（中央式、下限式）から $g\lambda_\Omega$ 、 $h\lambda_\Omega$ を算出し、建物に設置された全てのダンパーの特性値を一律に Table4 に示した値に低下させ、再度解析を行った結果（簡易手法）を比較する。

Table4 Damper parameters

Case	Ω [kN·mm/mm ³]	中央式		下限式	
		$g\lambda_\Omega$ [-]	$h\lambda_\Omega$ [-]	$g\lambda_\Omega$ [-]	$h\lambda_\Omega$ [-]
ART HACHI	0.0072	0.91	0.97	0.84	0.96
OS2	0.0124	0.85	0.95	0.78	0.94
OS1	0.0266	0.75	0.92	0.67	0.89

4.5 時刻歴応答解析結果

Fig.7 ~ 9 に ART HACHI, OS2, OS1 を入力した時の最大層間変形角、絶対加速度、層せん断力の高さ方向分布を示す。Fig.7, 8 より、ART HACHI, OS2 入力時、簡易手法で $g\lambda_\Omega$ を 1 ~ 2 割程度、 $h\lambda_\Omega$ を 0.5 割程度低下させたが、応答は特性変化なしと概ね同等の結果となった。Fig.9 より、OS1 入力時の簡易手法について $g\lambda_\Omega$ を 0.75 倍、 $h\lambda_\Omega$ を 0.92 倍に低下させた中央式では特性変化なしに対して最大層間変形角が 1.3 倍程度、絶対加速度が 1.2 倍程度となった。 $g\lambda_\Omega$ を 0.67 倍、 $h\lambda_\Omega$ を 0.89 倍に低下させた下限式では特性変化なしに対して最大層間変形角が 1.4 倍程度、絶対加速度が 1.3 倍程度となった。OS1 のように検討対象モデルの 1 次固有周期付近で大きな入力エネルギーとなる場合、ダンパーの特性値を低下させる簡易手法による検討が必要となる。

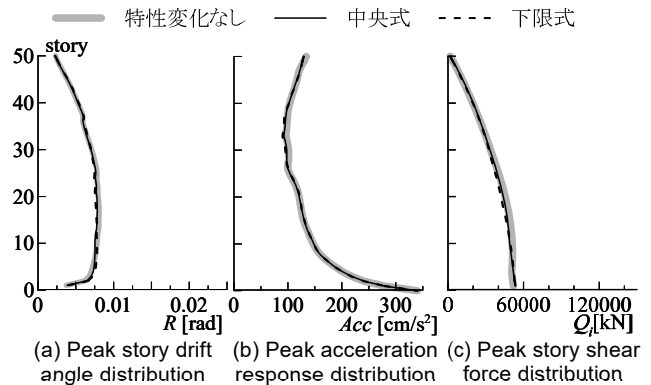


Fig.7 Peak story responses (ART HACHI)

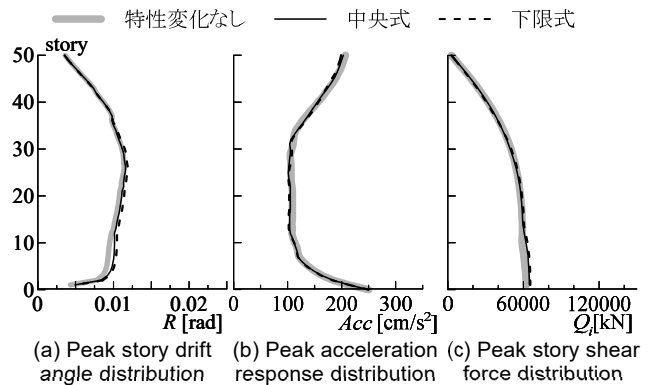


Fig.8 Peak story responses (OS2)

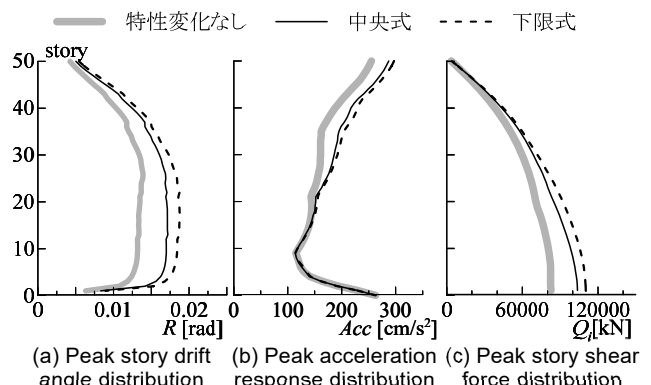


Fig.9 Peak story responses (OS1)

Fig.10にARTHACHI, OS2, OS1を入力した時のダンパー1基あたりのエネルギー吸収量 w_d の高さ方向分布を示す。ここでダンパーはYB通りのX4, X5の間にあるダンパーを代表して取り出す。Fig10より, ARTHACHI, OS2入力時の w_d はダンパー特性値を低下させた場合も特性変化なしと概ね変わらない。OS1入力時, ダンパー特性値を低下させた解析である簡易手法は w_d が低下することが確認できる。また, 下限式は中央式より大きく低下する。Fig.11に w_d が大きな値となる5層に設置したダンパーの τ_d - γ_d 関係を示す。Fig.11より, ARTHACHI, OS2, OS1の全てでダンパー特性値の低下率が大きいほど τ_d が低下し, γ_d が大きくなるのが分かる。Fig.12に地震終了時の構造減衰 (Damping) による吸収エネルギーと粘弾性ダンパーによるエネルギー配分を示す。Fig.12より, ARTHACHI, OS2ではダンパー特性値を低下させた場合も総エネルギー量 W は概ね変わらない。一方, OS1ではダンパー特性値の低下率が大きいほど W は小さくなり, 粘弾性ダンパーによるエネルギー配分が小さくなることを確認できる。

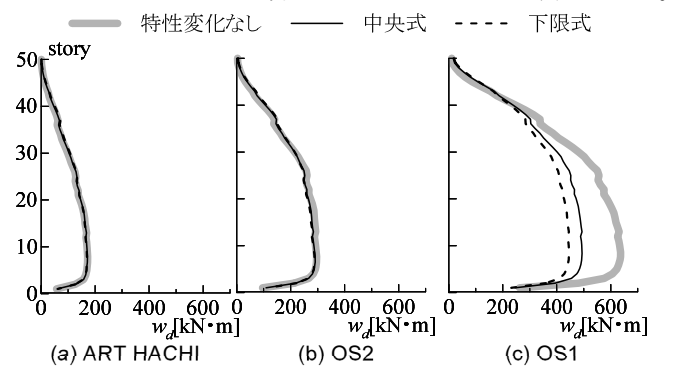


Fig.10 Energy absorption of damper per one unit

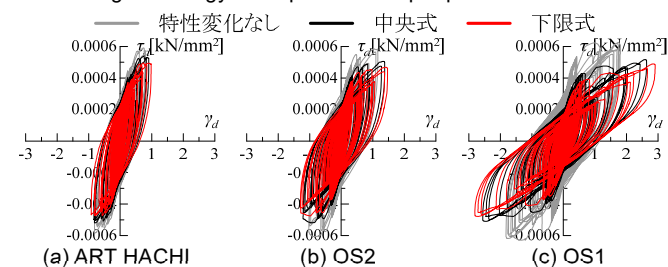


Fig.11 τ_d - γ_d (5F)

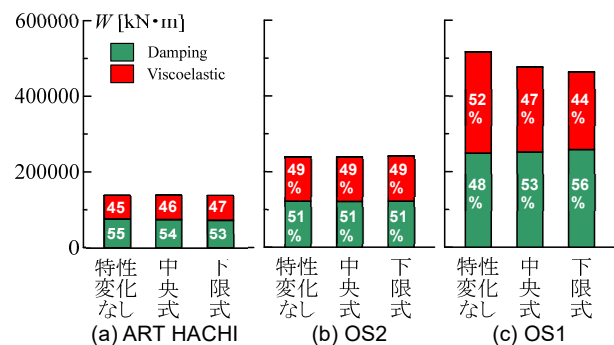


Fig.12 Energy distribution

5. まとめ

本報では G_{eq} , H_{eq} の低下率について近似式を作成し, 中央式および下限式を提案した。また, 50層建物モデルを用いて, 近似式から算出した G_{eq} , H_{eq} の低下率で解析を行い (簡易手法), 特性変化なしと比較した。レベル2相当の地震動ではダンパー特性値を低下させた場合も, 特性変化なしと概ね同等の結果となった。主架構の1次固有周期付近で大きな入力エネルギーとなる OS1 入力時の簡易手法は特性変化なしに対して最大層間変形角が1.4倍程度, 絶対加速度が1.3倍程度となった。入力エネルギーの大きな地震動の場合, 本報で示したダンパー特性値を低下させた簡易手法による検討が必要となる。

謝辞

本報告は, 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。JFE スチール株式会社の植木卓也氏には本報を執筆する上で貴重なご意見を賜りました。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) 安永集平, 佐藤大樹, 太木本仁志, 戸張涼太, 植木卓也: 間柱型粘弾性ダンパーの長周期地震動に対する性能評価 その2 多数回正弦波加振実験による特性変化の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.737-738, 2019.9
- 3) 笠井和彦, 佐藤大樹, 松田和浩, 長山祥: 長時間正弦波加振実験による4種の実大制振ダンパーの動的特性の変化および簡易評価手法の提案, 構造工科学論文集, 第63号, pp.275-284, 2017.3
- 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構成則 (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
- 5) 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, 第712号, pp.873-883, 2015.6
- 6) 臼田雄作, 佐藤大樹, 北村春幸, 松田頼征, 木村雄一, 山本優, 木村暢志: 単独地震の応答に基づく連動地震に対する超高層制振建物の応答推定手法—南海トラフ沿いにおける東海・東南海・南海三連動地震を対象として—, 日本建築学会構造系論文集, 第747号, pp.687-697, 2018.5
- 7) 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, pp.597-598, 2017.7
- 8) 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対策について (技術的助言), 2016.6

附録A ダンパーの実効変形比

Fig.A1にARTHACHI, OS2, OS1を入力した時のダンパーの実効変形比 (= ダンパーの最大変形/最大層間変形) β_e の高さ方向分布を示す。Fig.A1より, β_e について ARTHACHI, OS2, OS1を入力した時の全てで, 特性値の低下が最も大きい下限式で最大となる。

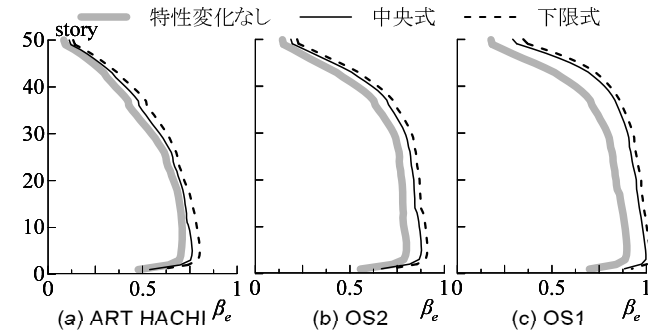


Fig.A1 Effective damper deformation ratio

*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

*1 Graduate Student, Tokyo Institute of Technology
 *2 Associate Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng
 *3 JFE Civil Engineering & Construction Corporation
 *4 JFE Steel Corporation