

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	長周期・長時間地震動時における実大ダンパーの特性評価 その2 減衰の違いによる置換正弦波パラメータの傾向および基準化エネルギー密度の提案
Title(English)	
著者(和文)	長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 松田和浩
Authors(English)	Sho Nagayama, Daiki Sato, KAZUHIKO KASAI, Kazuhiro Matsuda
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 393-396
Citation(English)	, , , pp. 393-396
発行日 / Pub. date	2016, 3

長周期・長時間地震動時における実大ダンパーの特性評価

その2 減衰の違いによる置換正弦波パラメータの傾向および基準化エネルギー密度の提案

構造—振動

正会員 ○ 長山祥<sup>\*1</sup>  
// 笠井和彦<sup>\*3</sup>

正会員 佐藤大樹<sup>\*2</sup>  
// 松田和浩<sup>\*4</sup>

制振構造 超高層建物 粘性ダンパー

粘弾性ダンパー 正弦波置換法 基準化エネルギー密度

1. はじめに

その1では、これまでに行われてきた4種の実大ダンパーに対する長時間正弦波加振実験をもとに、ダンパーの特性値の推移について報告した。

本報その2では、入力地震波を変化させた際の応答の違い、減衰を変化させた際に、置換正弦波<sup>10)</sup>のパラメータがどのように変化するかについて報告を行う。また、粘性・粘弾性ダンパーに三の丸波のような長周期地震動が発生した際の特性値低下についての評価を行う。

2. 建物概要および入力地震動

時刻歴応答解析で使用するモデルは、実在する建物高さ128m、30層の超高層の多質点系モデルである<sup>11), 12)</sup>。図1に質量分布、図2にNS, EW方向の剛性分布を示す。建物の1次の固有周期はNS方向で3.009s, EW方向で2.919sである(表1)。検討用地震動として、長周期地震動の一種である三の丸波<sup>13), 14)</sup>、コーナー周期 $T_c = 0.64s$ 以降の領域で、速度応答スペクトル $S_v = 80cm/s$  ( $h=5\%$ )となる模擬地震動波形ART HACHI(位相特性:HACHINOHE 1968 EW)とART KOBE(位相特性:JMA KOBE 1995 NS)を用いる<sup>15)</sup>。図3に加速度波形、図4に速度応答スペクトルを示す。図3中には最大加速度 $Acc_{max}$ とともに実効地震継続時間 $\epsilon t_0$ <sup>16)</sup>を併せて示す。

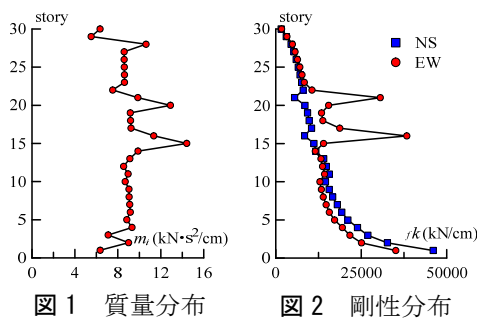


図1 質量分布

図2 剛性分布

表1 固有周期

	$1T$	$2T$	$3T$
NS	3.009	1.180	0.720
EW	2.919	1.097	0.669

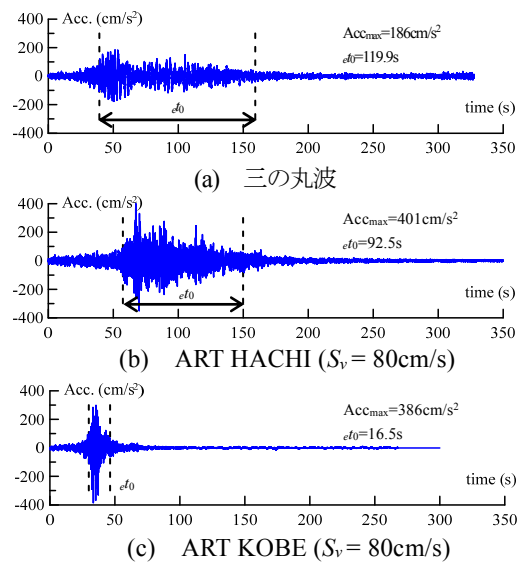


図3 入力地震波

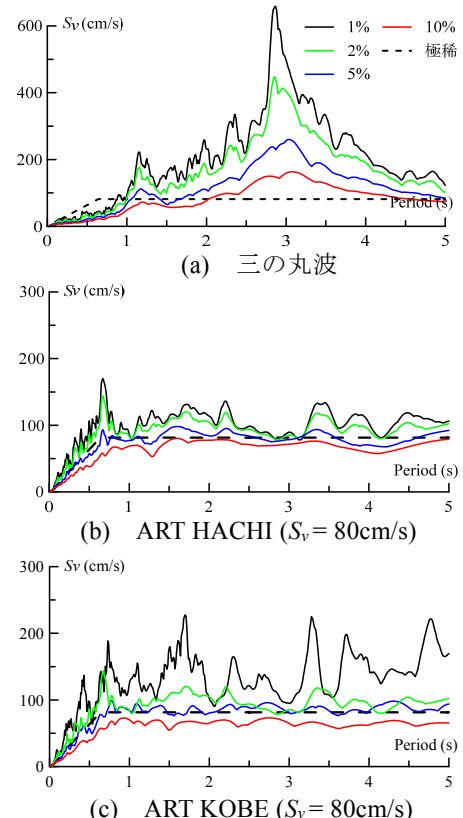


図4 速度応答スペクトル

### 3. 入力地震波による応答の違い

入力地震波による応答の違いを把握するため、三の丸波, ART HACHI, ART KOBE の3波を使用し時刻歴応答解析を行った。なお、減衰はレーリー型減衰とし、1次と2次でそれぞれ等しい1, 2, 5, 10%としている。図5に絶対対加速度, 図6に層間変形角を示す<sup>1)</sup>。

図5より、三の丸波入力時において減衰定数が2%から10%まで付加された場合、頂部での絶対加速度はNS方向

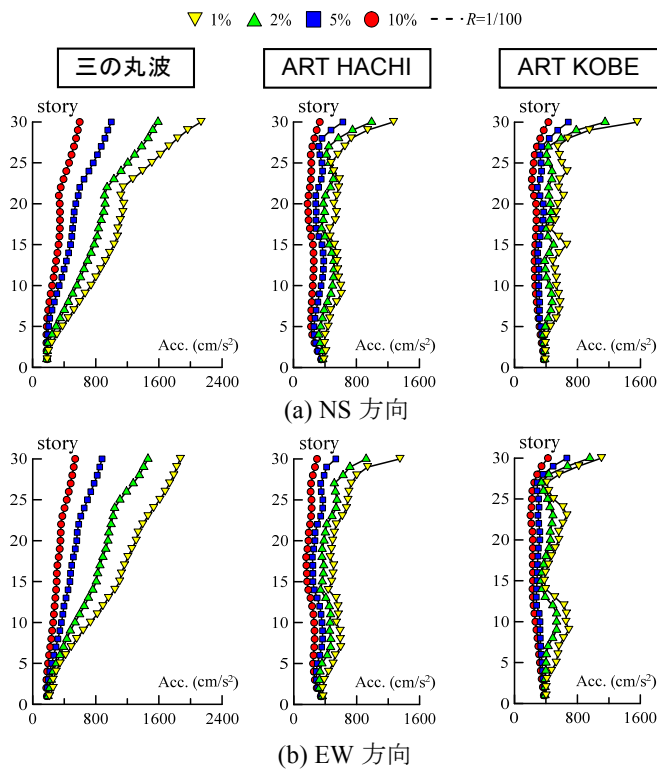


図5 絶対加速度

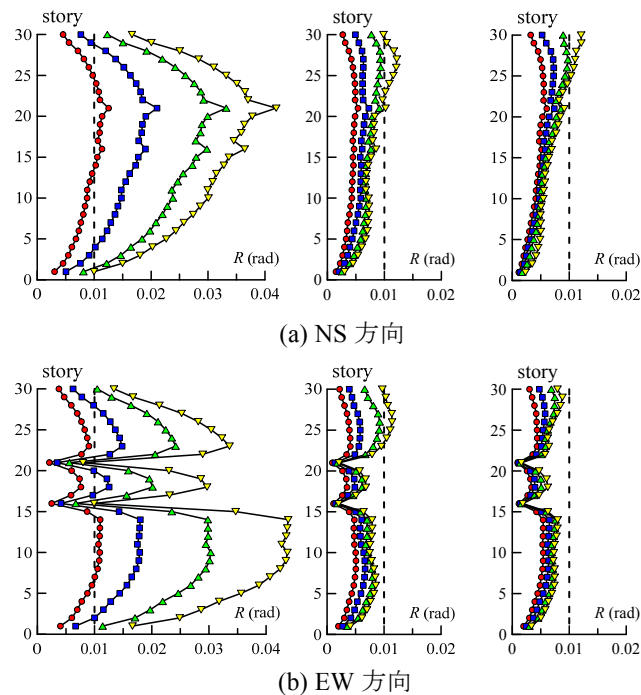


図6 層間変形角

で0.38倍, EW方向では0.37倍となった。同様に, ART HACHIにおいて, NS方向で0.34倍, ES方向で0.32倍となり, ART KOBEにおいて, NS方向で0.37倍, ES方向で0.45倍となった。図6より, ART KOBE, ART HACHIを入力した際, NS, EW両方向で減衰定数2%時に層間変形角  $R = 1/100$  以内に収まることが確認された。

### 4. 減衰の違いによる置換正弦波パラメータの傾向

三の丸波入力時での応答が大きかったことから、三の丸波を対象に、置換正弦波のパラメータの算出を行う。正弦波置換法<sup>10)</sup>とは、ランダム波に内在する様々なパラメータを、共通の振幅と振動数で表される正弦波に置換することで、様々なランダム波を用いることなく、正弦波のみでその特性を包括的に把握できる手法である。さらに、本手法は、ランダム振動時の特性を、これまで提案されている定常状態の理想化された理論や計算法などにつなげることができるため非常に有用である。

以下に、置換正弦波パラメータの算出方法について述べる。長時間の振動による粘弾性体の耐久性などの確認にはダンパーの繰返し回数が重要となるため、置換正弦波の置換振動数  $f_r$  は、ランダム波と置換正弦波で繰返し回数が等しくなるように決定する。また、置換振幅  $A_r$  は、ランダム波と置換正弦波でダンパー応答が等しくなるように決定する。置換振動数  $f_r$  および置換振幅  $A_r$  は、地震動時のダンパー応答波形がゼロ軸を正の傾きで越える回数(繰返し数)  $N_0^+$ , ダンパー応答の継続時間  $u_{t0}$  およびダンパー応答の標準偏差  $\sigma_u$  を用いて式(1.a, b)より算出される。

$$T_r = \frac{u_{t0}}{N_0^+}, \quad A_r = \sqrt{2}\sigma_u \quad (1.a, b)$$

建物にダンパーをブレース型で配置している状態を仮定し、ダンパーの取付け角を  $30^\circ \sim 45^\circ$  とすると、ダンパーの軸方向変位は水平変位の約0.8倍となるため、得られた層間変形を0.8倍とし、置換正弦波のパラメータの算出を行っている。図7に高さ方向における置換周期  $T_r$  と建物の1次の固有周期  ${}_1T$  を比較したもの、図8に置換振幅  $A_r$  を示す。結果より、減衰が変化しても置換周期は、建物の1次の固有周期  ${}_1T$  とおおむね等しくなることが確認された。また、置換振幅  $A_r$  は、層間変形と同様の傾向を示した。

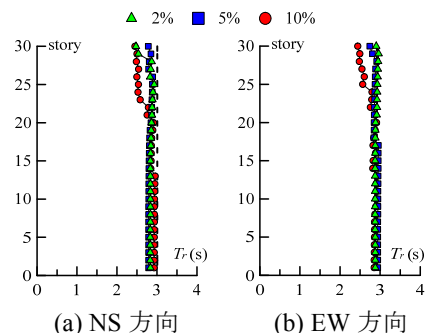


図7 置換周期  $T_r$

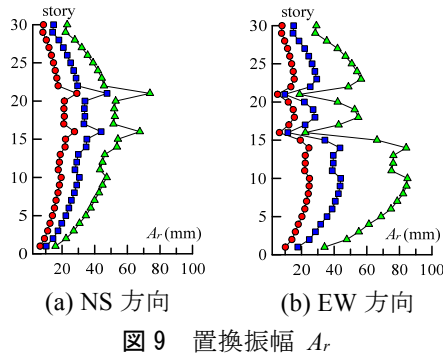


図9 置換振幅  $A_r$

## 5. 実験値による特性値の評価

### 5.1 粘性ダンパー

時刻歴応答解析より得られた置換正弦波のパラメータから、粘性ダンパーに三の丸波が入力された際の低減率の評価を行う。その1において、粘性ダンパーの特性値は、累積エネルギー吸収量との関係で一様に表せられることから、評価式より累積エネルギー吸収量の算出を行う。粘性ダンパーの累積エネルギー吸収量は以下の評価式より算出される<sup>17)</sup>。

$$K_d^n = \frac{C_d \omega_r^\alpha}{A_{r,\max}^{1-\alpha}} \quad (3)$$

$$W_d = 4e^{-0.24\alpha} K_d^n A_{r,\max}^2 \quad (4)$$

$$\sum W_d = W_d \cdot N_0^+ \quad (5)$$

粘性ダンパーの規格値より、内部粘性  $C_d = 98 \text{ kN}/(\text{mm}/\text{s})^\alpha$ 、 $\alpha = 0.38$  である。なお、想定するダンパーはその1において使用した D2-2F ダンパー(実験番号 V-2~6)での実験結果を用いて評価を行う。ここで、内部剛性および取付け部などの周辺部材を剛と仮定し、ダンパーの変形は、全てダッシュポットの変形とする。これらより算出した高さ方向の累積エネルギー吸収量  $\sum W_d$  を図10に示す。図10より、累積エネルギー吸収量は置換振幅と類似した傾向を示すことから、置換振幅の影響が大きいと言える。

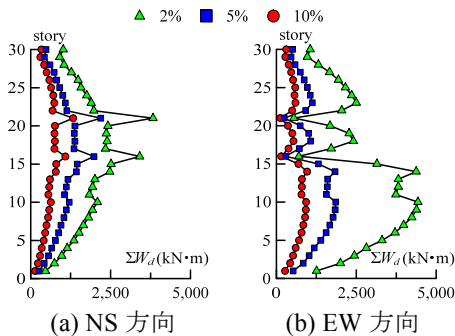


図10 累積エネルギー吸収量  $\sum W_d$  (粘性ダンパー)

また、得られた置換正弦波のパラメータから累積エネルギー吸収量が最大の層の値を実験値にプロットしたものを図11に示す。図11より、粘性ダンパーに三の丸波が入

力されることを想定した場合、等価減衰10%時に特性値が0.75倍、5%時には0.6倍、2%時にはおよそ0.5倍ほど特性値が低下することが予想されことから、減衰定数が小さいほど、特性値の低下が著しくなるため注意が必要である。

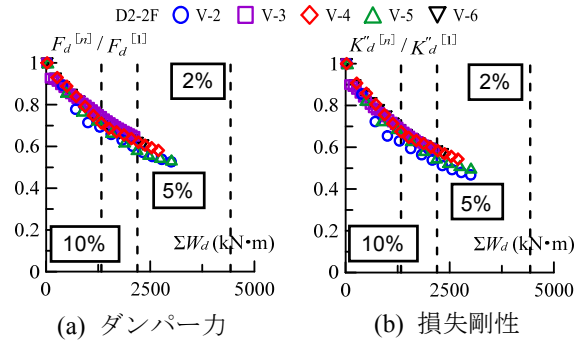


図11 粘性ダンパー特性値の評価

### 5.2 粘弾性ダンパー

前節と同様に、置換正弦波のパラメータより、粘弾性ダンパーに三の丸波が入力された際の低減率の評価を行う。粘弾性ダンパーの累積エネルギー吸収量は以下の評価式より算出される<sup>17), 18)</sup>。

$$G'(\omega) = G \frac{1 + ab\omega^{2\alpha} + (a+b)\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)}{1 + a^2\omega^{2\alpha} + 2a\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (6)$$

$$\eta(\omega) = \frac{(-a+b)\omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)}{1 + ab\omega^{2\alpha} + (a+b)\omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (7)$$

$$K_d' = \frac{As}{t} \cdot G' \quad (8)$$

$$W_d = \pi \eta_d K_d' u_{d,\max}^2 \quad (9)$$

累積エネルギー吸収量の算出は式(5)より行う。ここで、 $a, b, \alpha, G$  は粘弾性体の温度・振動数依存性を評価する係数である。本材料の温度  $20^\circ\text{C}$  でのパラメータは  $a = 5.6 \times 10^{-5}$ 、 $b = 2.10$ 、 $\alpha = 0.558$ 、 $G = 3.92 \text{ N}/\text{cm}^2$  である。

その1において粘弾性ダンパーの特性値の低減率は、ひずみに比例し、周期に反比例する特徴であることから、これらを考慮して基準化を行う。基準化エネルギー密度  $\Omega$  を以下のように定義する。

$$\Omega = \frac{\sum W_d \cdot \gamma^{\beta_1}}{s\rho \cdot V \cdot T^{\beta_2}} \quad (10)$$

これは、単位時間当たりの発熱量を表す。本報においては、ひずみ・周期の係数である  $\beta_1$  と  $\beta_2$  を1としているが、これは、材料によって変化する可能性がある。なお、想定するダンパーはその1において使用した D1-2F、D3-3F ダンパー(実験番号 E-2~11)での実験結果を用いて評価を行う。これらより算出した高さ方向の基準化エネルギー密度  $\Omega$  を図12に示す。

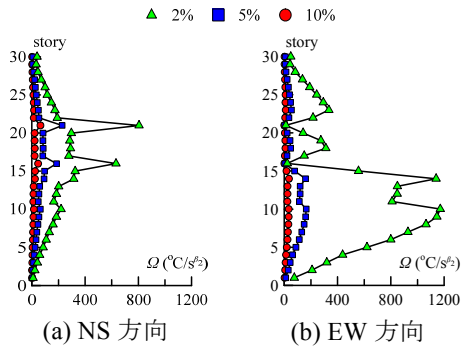


図 12 基準化エネルギー密度  $\Omega$  (粘弾性ダンパー)

これらより得られた基準化エネルギー密度が最大の層の値を実験値にプロットしたものを図 13 に示す。

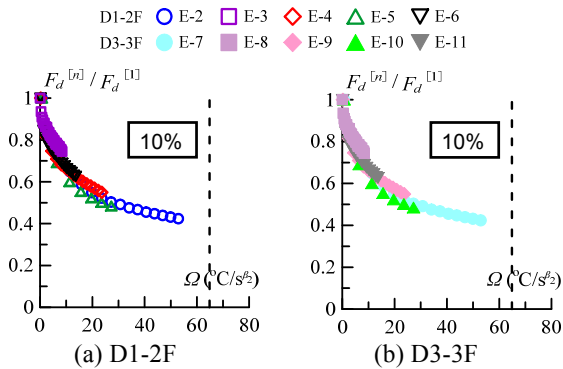


図 13 粘弾性ダンパーの特性値の評価

図 13 より、基準化エネルギー密度に対する特性値低下の傾向は一様に表すことができる。今回使用した粘弾性ダンパーに三の丸波が入力されることを想定した場合、等価減衰 10%時に D2-2F, D3-3F ダンパーともに、特性値が 0.4 倍まで低下することが予想される。

## 6. まとめ

本報では、入力地震波を変化させた際の応答の違い、減衰を変化させた際に、置換正弦波のパラメータがどのように変化するかについて報告した。また、粘性・粘弾性ダンパーに三の丸波のような長周期地震動が発生した際の特性値低下についての評価を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 置換周期  $T_r$  は減衰定数によらず、建物の 1 次の固有周期  $1T$  とおおむね等しくなることが確認された。また、置換振幅  $A_r$  は、層間変形と同様の傾向を示した。
- (2) 粘性ダンパーの動的特性の評価式より、三の丸波が入力されることを想定した場合、等価減衰 10%時に特性値が 0.75 倍、5%時には 0.6 倍、2%時にはおよそ 0.5 倍ほど特性値が低下することが予想される。
- (3) 粘弾性ダンパーにおいて、基準化エネルギー密度に対する特性値低下の傾向は一様に評価できる。三の丸波が入力されることを想定した場合、等価減衰 10%時に D2-2F, D3-3F ダンパーともに、特性値が 0.4 倍まで低減することが予想される。

今後の方針として、収斂計算による特性値の予測を行っていく。

## 謝辞

本研究は、元東京工業大学笠井研究室の、小松祐樹氏、西島正人氏、後藤尚哉氏、茶谷友輔氏、山本英和氏、境原直紀氏、杉山暢方氏の研究成果の一部を用いたものです。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 笠井和彦, 馬場勇輝, 西澤恵二, 引野剛, 伊藤浩資, 大木洋司, 元結正次郎: 鋼材ダンパーを有する試験対の実験結果 3 次元震動台による実大 5 層制振鋼構造建物の実験研究 その 2, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 673 号, pp.499-508, 2012.3
- 2) 笠井和彦, 馬場勇輝, 伊藤浩資, 所健, 引野剛, 大木洋司, 村井亮平: 粘弾性ダンパーをもつ実大 5 層鉄骨建物の 3 次元震動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 676 号, pp.985-994, 2012.6
- 3) 笠井和彦, 山際創, 馬場勇輝, 伊藤浩資, 引野剛, 大木洋司: オイルダンパーをもつ実大 5 層鉄骨建物の 3 次元震動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 693 号, pp.1999-2008, 2013.11
- 4) 笠井和彦, 山際創, 西島正人, 馬場勇輝, 伊藤浩資, 引野剛, 大木洋司: 粘性ダンパーをもつ実大 5 層鉄骨建物の 3 次元震動台実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻, 第 695 号, pp.47-56, 2014.1
- 5) 山本英和, 西島正人, 笠井和彦: 粘性ダンパーの限界性能試験 (E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その 97), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.1343-1344, 2013.8
- 6) 杉山暢方, 山本英和, 笠井和彦: 実大粘性・オイルダンパーの載荷実験とそれらの解析手法の構築 その 2 (E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その 107), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.1015-1016, 2014.9
- 7) 佐藤大樹, 笠井和彦, 境原直紀: 長周期地震動を想定した実大粘弾性ダンパー実験と動的特性の変化を再現した解析- その 1 (E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その 104), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.1009-1010, 2014.9
- 8) 杉山暢方, 笠井和彦, 佐藤大樹, 松田和浩: 長時間の風外力における実大粘弾性ダンパーの特性評価実験 その 2 風応答波によるダンパー動的特性の変化および正弦波置換法の検証, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2015.3
- 9) 茶谷友輔, 笠井和彦: 長周期地震動における鋼材ダンパーの限界性能評価 (E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その 103), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.1007-1008, 2014.9
- 10) 佐藤大樹, 笠井和彦: 長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパーの特性および正弦波による評価手法, 構造工学論文集, Vol.53B, pp.67-74, 2007.3
- 11) 白崎和幸, 久田嘉章, 山下哲郎, 荒川洋輔, 久保智弘, 笠井和彦: 首都圏で想定される多様な地震動に対する超高層建物の制振補強の検討 -その 1 振動特性の同定と 3 次元立体フレームモデルの構築-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.887-888, 2014.9
- 12) Kazuhiko Kasai, Xilin Lu, Wuchuan Pu, Tetsuo Yamashita and Yousuke Arakawa and Ying Zhou: Effective Retrofit Using Dampers for a Steel Tall Building Shaken by 2011 East Japan Earthquake -- China-Japan Cooperation Program (Part 2), Proc. of 10th CUEE Conference, pp.1295-1302, Tokyo, Japan, March 1-2, 2013
- 13) 愛知県建築住宅センター: 名古屋三の丸地区における地域特性を考慮した耐震改修のための基盤地震動の作成 (概要版), (財) 愛知県建築住宅センター耐震構造委員会設計用入力地震動検討部会, pp.1-48, 2004.6
- 14) 佐藤大樹, 島田侑, 大内隼人, 長江拓也, 北村春幸, 福山國夫, 梶原浩一, 井上貴仁, 中島正愛: 長周期地震動を受ける鋼構造超高層建物のエネルギー吸収と分担率 -部分切り出し架構に対する E-ディフェンス振動台実験-, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 653 号, pp.1217-1226, 2010.7
- 15) 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, 第 661 号, pp.543-552, 2011.3
- 16) 佐藤大樹, 大内隼人, 長江拓也, 五十幡直文, 北村春幸, 中島正愛: 実大架構内に設置したオイルダンパーの性能評価および長周期地震動による温度上昇, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.529-530, 2010.9
- 17) 日本免震構造協会(JSSI): パッシブ制振構造設計 -施工マニュアル第 1 版, 2003.10; 第 2 版, 2005.9; 第 3 版, 2013.11
- 18) 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

\*1 東京工業大学 大学院生

\*2 東京工業大学 建築物物理研究センター 准教授・博士 (工学)

\*3 東京工業大学 建築物物理研究センター 教授・Ph.D

\*4 東京工業大学 建築物物理研究センター 助教・博士 (工学)