

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	間柱型粘弾性ダンパーの長時間繰返し加振時における性能評価
Title(English)	
著者(和文)	戸張涼太, 太木本仁志, 植木卓也, 安永隼平, 宮川和明, 佐藤大樹
Authors(English)	Ryota Tobar, Hitoshi Takimoto, Takuya Ueki, Jumpei Yasunaga, Kazuaki Miyagawa, Daiki Sato
出典(和文)	第13回日中建築構造技術交流会論文集, , ,
Citation(English)	, , ,
発行日 / Pub. date	2019, 9

間柱型粘弾性ダンパーの 長時間繰返し加振時における性能評価

戸張 涼太¹⁾, 太木本 仁志²⁾, 植木 卓也³⁾, 安永 隼平³⁾, 宮川 和明¹⁾, 佐藤 大樹²⁾

Ryota TOBARI¹⁾, Hitoshi TAKIMOTO²⁾, Takuya UEKI³⁾,

Jumpei YASUNAGA³⁾, Kazuaki MIYAGAWA¹⁾ and Daiki SATO²⁾

1) JFE シビル株式会社, 2) 東京工業大学, 3) JFE スチール株式会社

Abstract

This paper describes the behavior of a visco-elastic damper for seismic control structure under long-term vibration. In general, viscoelastic dampers have temperature dependency, and the temperature of the visco-elastic material rises during an earthquake. Therefore, the performance declines in long-term earthquakes. In this report, we show the evaluation result of performance degradation in large amplitude and long-time repeated vibration, based on repeated vibration tests. In addition, we applied a method that can easily evaluate complex vibrations by replacing random waves with equivalent sinusoidal wave. Thus, we evaluated the effectiveness of the method and showed the change of the characteristic by this method under the long period ground motion.

Keywords: Visco-elastic damper, Long-time repeated vibration, Long period ground motion.

1. はじめに

近年、長周期・長時間地震動の発生が予測され、建築物の耐震設計でも対応が求められている。免震・制振構造は長周期・長時間地震動に対する有効な対策の一つであるが、大振幅かつ長時間の繰返し加振による免制振部材の性能の変化が問題となる。このような背景のもと、免震部材を中心に繰返し加振時の性能評価が多数報告されており^{例えば1~3)}、免震・制振構造物の設計においては、免制振部材の性能変化を考慮する必要がある。

そこで本研究では、間柱型の粘弾性ダンパーを対象に、大振幅かつ長時間の繰返し加振時の性能評価を目的とする。本報では、長時間の繰返し加振実験結果に基づき、大振幅かつ長時間の繰返し加振時の性能評価結果を示す。さらに、佐藤らが提案する、正弦波による試験結果を利用してランダム振動時のダンパー特性を幅広く評価することができる、正弦波置換法⁴⁾の有効性を検証する。

2.3 ダンパー特性値の算出方法

以下に、本報で用いる各パラメータ値の算出方法を示す。粘弾性ダンパーのせん断変形 u_d は下式より求める。

$$u_d = x_1 - x_2 - \frac{y_2 - y_1}{894} \cdot 405 - \frac{y_4 - y_3}{440} \cdot 330 \quad (1)$$

ダンパーのせん断応力度 τ_d およびダンパーのせん断ひずみ γ_d は下式で求める。

$$\tau_d = \frac{F_d}{A}, \quad \gamma_d = \frac{u_d}{d} \quad (2), (3)$$

ここで、 F_d : ダンパー力 (アクチュエータの荷重とする)、 A : 粘弾性体面積 (=468,512 mm²)、 d : 粘弾性体の厚さである。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 は下式から求められる。

$$\tau_{d \max}^{[n]} = \frac{|\tau_{d, \max}^{(2n)}| + |\tau_{d, \max}^{(2n+1)}|}{2} \quad (4)$$

$$\Omega^{[n]} = \sum_{i=1}^{N_D} \frac{(\tau_d^{(i)} + \tau_d^{(i+1)}) \cdot (\gamma_d^{(i+1)} - \gamma_d^{(i)})}{2} \quad (5)$$

ここで、 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.2 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 Ω は 1 サイクルごとのダンパーのせん断力-ひずみ関係の履歴の面積より算出しており、エネルギー密度に半波 1 および各加振条件の最後の 1 サイクルは含まない。なお、 $()$ はステップ、 $\langle \rangle$ は半波、 $[\]$ はサイクルを意味する。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、それぞれ下式より求めることとする。

$$G_{eq}^{[n]} = \frac{|\tau_{d, \max}^{(2n)}| + |\tau_{d, \max}^{(2n+1)}|}{|\gamma_{d, \max}^{(2n)}| + |\gamma_{d, \max}^{(2n+1)}|} \quad (6)$$

$$H_{eq}^{[n]} = \frac{\Omega^{[n]}}{2\pi \cdot G_{eq} \left(\frac{|\gamma_{d, \max}^{(2n)}| + |\gamma_{d, \max}^{(2n+1)}|}{2} \right)^2} \quad (7)$$

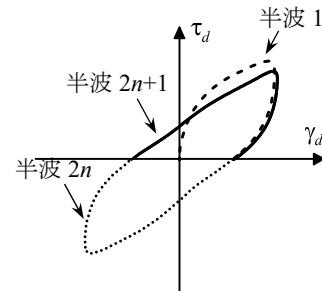


Fig. 2 Definition of half wave

2.4 加振実験結果

Fig.3(a), (b)に $f=0.33\text{Hz}$, $\gamma_d=100\%$, 100 サイクルの正弦波を入力した時のせん断応力度 τ_d とダンパーひずみ γ_d の関係を示す。(a)は 1~33 サイクル、(b)は 34~66 サイクルである。Fig.3 より、早期にせん断応力度 τ_d が低下するものの、以降は一定のループを描くことが確認できる。Fig.4 に $f=0.33\text{ Hz}$, $\gamma_d=100\%$, 100 サイクルの正弦波を入力した時の、粘弾性パネル部の各温度計測位置での温度時刻歴を示す。温度計測は各位置の両面で行っており、凡例記号最後の f および b は各位置の表面および裏面を意味する。同図より、粘弾性パネル部で計測した 6 箇所の温度上昇は同様の傾向を示すことがわかる。以降はパネル中央部の T1b のみ着目する。

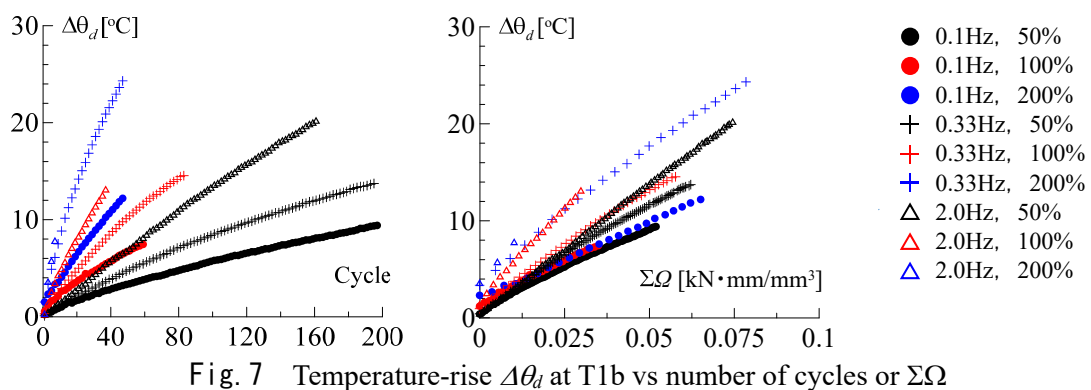
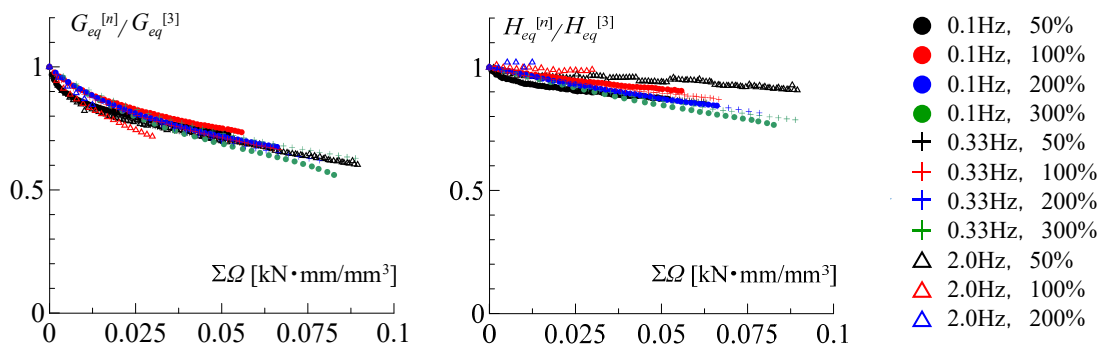
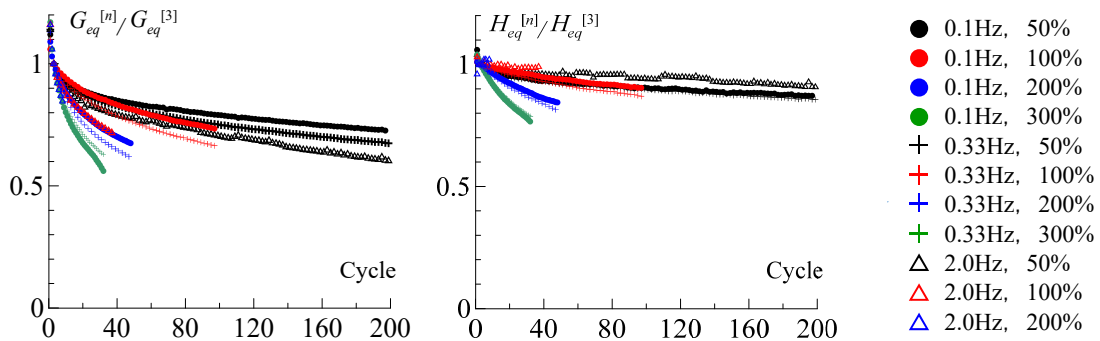
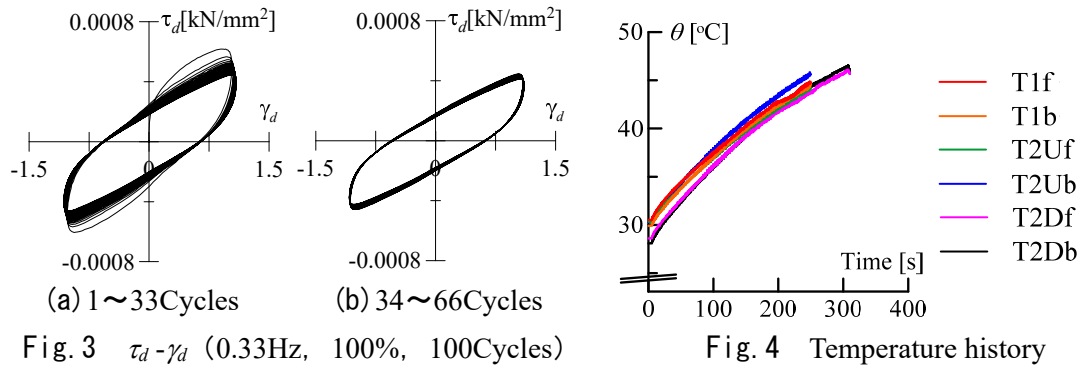


Fig.5(a), (b)にサイクル数に対する等価せん断弾性率 G_{eq} , 等価減衰定数 H_{eq} の低下率を示す. グラフ縦軸の低下率は n サイクル目の G_{eq} , H_{eq} を 3 サイクル目の値で基準化しており, 2 サイクル毎にプロットしている. Fig.5(a), (b)より, 異なるひずみ, 振動数の加振条件では, サイクル数と特性値の低下率の傾向は様々である. ここで, 種々の加振条件での特性値の低下率を一様に評価するため, エネルギー密度の累積値 $\Sigma\Omega$ を定義し, $\Sigma\Omega$ と特性値の低下率の傾向を確認する.

$$\Sigma\Omega^{[n]} = \sum_{i=3}^n \Omega^{[i]} \quad (8)$$

Fig.6(a), (b)に累積エネルギー密度 $\Sigma\Omega$ と G_{eq} , H_{eq} の 3 サイクル目の値に対する低下率の関係を示す。横軸の累積エネルギー密度 $\Sigma\Omega$ は 3 サイクル目からの累積としている。なお Fig.5 と同様にプロットは 2 サイクル毎の値としている。Fig.6(a), (b)より、累積エネルギー密度と G_{eq} および H_{eq} の低下率の関係は、種々のひずみ、振動数の加振条件でも概ね同一の線上に近づくことがわかる。Fig.7(a), (b)に各加振条件のサイクル数および累積エネルギー密度に対する、加振開始時の温度からの上昇温度 $\Delta\theta_d$ を示す。なお、温度は T1b の値を用いるが、 $\gamma_d = 300\%$ の実験では早期に熱電対が損傷したため計測できていない。(a)はサイクル数、(b)はエネルギー密度を横軸としているが、上昇温度とエネルギー密度の関係は、様々な加振条件でも似た傾向を示す。

3. 正弦波置換法の適用

前章では正弦波加振実験の結果を用いて各特性値の低下率の傾向を確認した。しかし、実地震動を考えた場合、ランダム応答下での各特性値の変動を評価する必要があり、ランダム応答と正弦波応答の対応を図る手法として、正弦波置換法^{4)~6)}が提案されている。正弦波置換法とは、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、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。ランダム波による長時間の加振試験は、ランダム波の選定や作成が煩雑であること、アクチュエータや制御コンピュータの性能により、一般的に実験が困難な場合も多い。また、ランダム波での評価値は、特定の地震波に対する特解でしかない。一方で正弦波置換法は、実験が非常に簡便となるだけでなく、これまで数多く行われてきた正弦波による試験結果を利用して、ランダム振動時のダンパー特性を幅広く評価することができる利点を有する。本章では、ランダム応答から置換正弦波を作成し、ランダム波と置換正弦波を用いた加振実験の結果から、本報で用いる間柱型粘弾性ダンパーを対象とした正弦波置換法の有効性を検証する。

3.1 置換正弦波の作成

ランダム波を正弦波に置換した場合の振幅 u_d および振動数 f_r はランダム振動時のダンパーの実効継続時間 t_0 (ダンパー変位波形の二乗累加値が全体の 5~95%となる時間)、 t_0 間における標準偏差 $u_{d,rms}$ および繰返し数 N_0^+ (変位波形が 0 軸を正の傾きで超える回数) を用いて次式よりそれぞれ求めることができる⁴⁾。

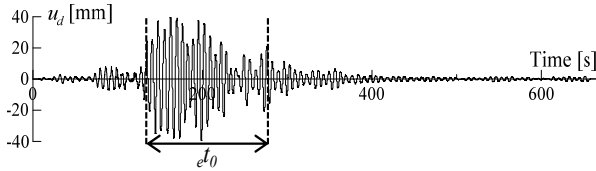
$$u_d = \sqrt{2} \cdot u_{d,rms} \quad (8)$$

$$f_r = N_0^+ / t_0 \quad (9)$$

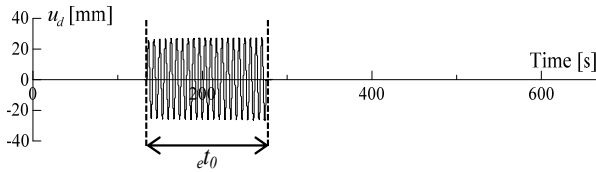
本章で置換正弦波作成の元とするランダム波は、鉄骨造 50 階建の事務所ビルを想定して、OS1, OS2 の地震動を入力した時刻歴応答解析より得られた粘弾性ダンパーの変位波形⁷⁾とする。置換正弦波のパラメータを Table 2 に、ランダム波とその置換正弦波の時刻歴波形を Fig.8, 9 に示す。ランダム波および置換正弦波による加振実験は Table 1 に示した試験体 D に該当し、計測箇所は全て前章と同様である。

Table 2 Equivalent sine wave

	$u_{d, rms}$	N_0^+	$e t_0$	u_d	f_r
	[mm]	[-]	[s]	[mm]	[Hz]
OS1	21.78	21	140.72	30.80	0.15
OS2	10.57	23	158.00	14.94	0.15

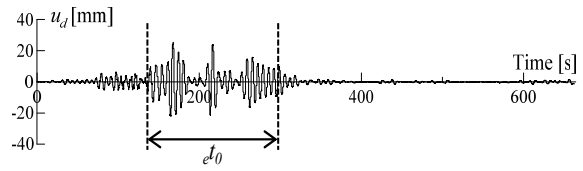


(a) OS1 response wave

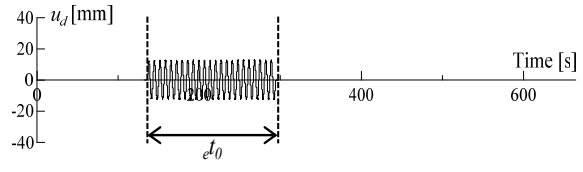


(b) Equivalent sine wave

Fig. 8 Damper displacement history : OS1



(a) OS2 response wave

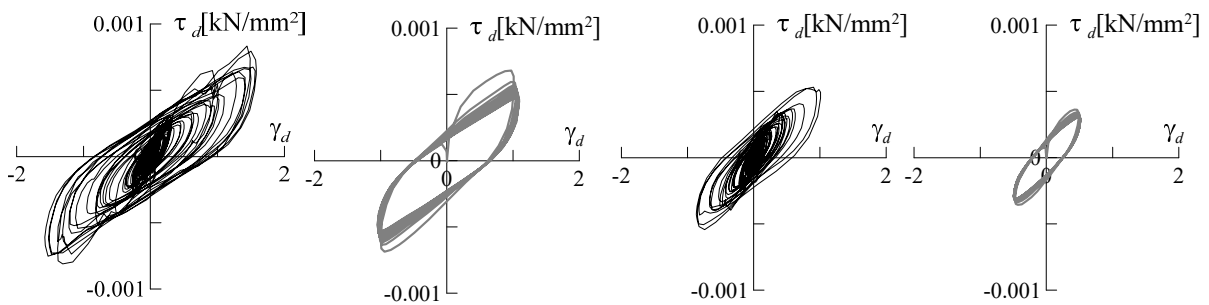


(b) Equivalent sine wave

Fig. 9 Damper displacement history : OS2

3.3 正弦波置換法と実験結果の比較

Fig.10, 11 に OS1, OS2 のランダム波形およびその置換正弦波により加振した場合のせん断応力度 τ_d , ひずみ γ_d の関係を示す. Fig.12, 13 に累積エネルギー密度 Ω および粘弾性パネル中央部の初期温度からの上昇温度 $\Delta\theta_d$ の時刻歴をそれぞれ示す. Fig.12 より, OS1, OS2 のランダム波と置換正弦波での加振終了時のエネルギー密度は概ね一致することが確認できる. Fig.13 では, OS2 のランダム波と置換正弦波で上昇温度はほぼ一致しているものの, OS1 の場合, 置換正弦波の方が上昇温度が大きくなっており, これは初期温度の違いによると考えられる.



(a) OS1 (random) (b) Equivalent sine wave

Fig. 10 $\tau_d - \gamma_d$ Loop : OS1

(a) OS2 (random) (b) Equivalent sine wave

Fig. 11 $\tau_d - \gamma_d$ Loop : OS2

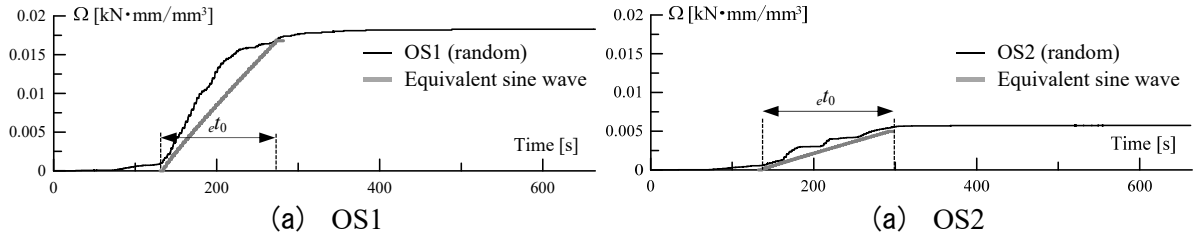


Fig. 12 Ω history

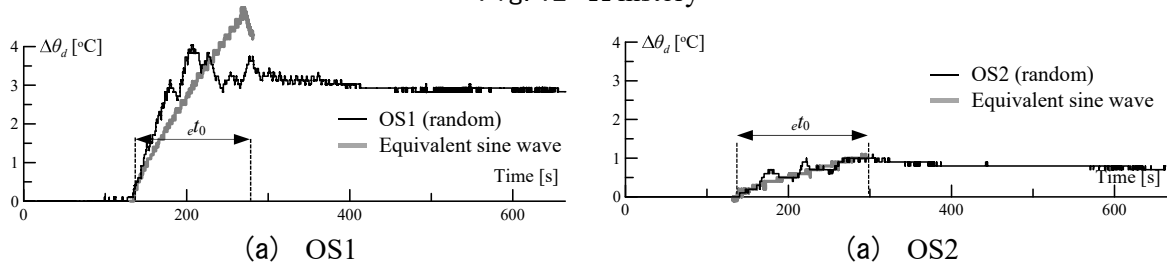


Fig. 13 Temperature rise $\Delta\theta_d$ at T1b

3.4 OS1, OS2 入力時のダンパーの性能評価

Fig.14(a), (b)に OS1, OS2 の置換正弦波の累積エネルギー密度 Ω に対する等価せん断弾性率 G_{eq} , 等価減衰定数 H_{eq} の低下率を示す. 同図より, OS1 および OS2 入力時の各特性値の低下率を評価すると, OS1 の場合 $G_{eq} : 15\%$, $H_{eq} : 4\%$, OS2 の場合 $G_{eq} : 9\%$, $H_{eq} : 4\%$ ほどである.

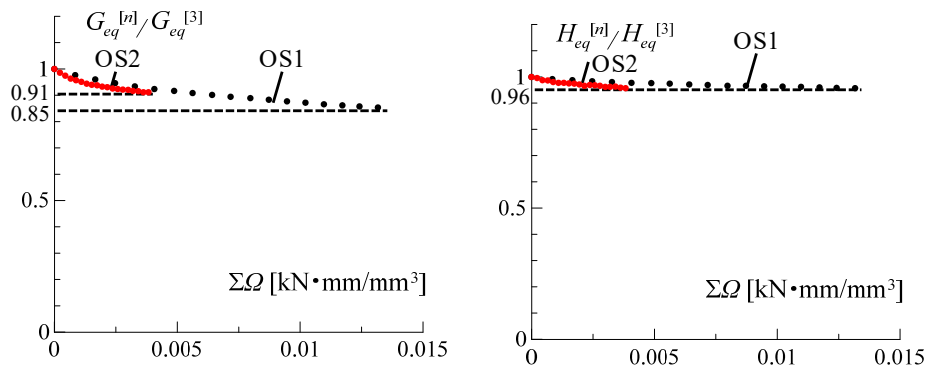


Fig. 14 Normalized dynamic properties vs. energy density

4. まとめ

間柱型粘弾性ダンパーを対象として, 長時間繰返し加振実験を行い, 繰返し加振時の間柱型粘弾性ダンパーの性能を評価した. 以下に得られた知見を示す.

- ・ 等価せん断弾性率 G_{eq} または等価減衰定数 H_{eq} の低下率とエネルギー密度の関係は, 異なる振動数, ひずみの条件においても同様の傾向を示すことを確認した.
- ・ ダンパーの変位応答波形から作成した置換正弦波による加振実験より, ダンパーのエネルギー密度と粘弾性体の温度上昇値は, ランダム応答波形とその置換正弦波で概ね同等であることを確認し, 正弦波置換法の有効性を示した.
- ・ OS1 および OS2 の応答の置換正弦波を用いた実験の結果より得られた G_{eq} と H_{eq} の低下率は, OS1 で $G_{eq} : 15\%$, $H_{eq} : 4\%$, OS2 で $G_{eq} : 9\%$, $H_{eq} : 4\%$ であった.

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。JFE シビル株式会社の吉永光寿氏には本報を執筆する上で貴重なご意見を賜りました。また、株式会社ブリヂストンより試験体をご提供いただきました。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] 飯場正紀, 長島一郎, 日比野浩, 竹中康雄, 近藤明洋, 中西啓二, 猿田正明, 山本雅史, 嶺脇重雄, 小豆畑達哉, 井上波彦: 免震部材の多数回繰り返し特性と免震建築物の地震応答性状への影響に関する研究, 建築研究資料, No.170, 2016.4
- [2] 長島一郎, 佐藤栄児, 日比野浩, 飯場正紀, 欄木龍大, 北村春幸, 成原弘之ほか: 大型震動台を用いた長周期地震動に対する実大免震部材の加力実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.395-396, 2012.9
- [3] 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, 第 24 巻, 第 56 号, pp.59-62, 2018.2
- [4] 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, 第 53 号, pp.67-74, 2007.3
- [5] 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, 構造工学論文集, 第 63 号, pp.275-284, 2017.3
- [6] 佐藤大樹, 長江拓也, 北村春幸, 梶原浩一: 長周期地震動を受ける超高層建物のオイルダンパーによる制振補強効果, 日本建築学会技術報告集, 第 58 号, pp.969-974, 2018.10
- [7] 戸張涼太, 佐藤大樹, 太木本仁志, 安永隼平, 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 1~3 (投稿済), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2019.9