

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	長時間繰り返しによ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風応答評価
Title(English)	Evaluating the wind response of high-rise buildings with stud-type viscoelastic damper declining performance caused by long duration vibration
著者(和文)	樹下亮佑, 佐藤大樹, 太木本仁志, 戸張涼太, 安永隼平, 植木卓也
Authors(English)	Ryosuke Kinoshita, Daiki Sato, Hitoshi Takimoto, Ryota Tobar, Jumpei Yasunaga, Takuya Ueki
出典(和文)	風工学シンポジウム講演梗概集, , No. 26, pp. 96-101
Citation(English)	National Symposium on Wind Engineering Proceeding, , No. 26, pp. 96-101
発行日 / Pub. date	2020, 11

長時間繰り返しによる間柱型粘弾性ダンパーの性能低下を考慮した 超高層建物の風応答評価

Evaluating the wind response of high-rise buildings with stud-type viscoelastic damper declining performance caused by long duration vibration

樹下亮佑¹⁾ 佐藤大樹²⁾ 太木本仁志³⁾ 戸張涼太⁴⁾ 安永隼平⁵⁾ 植木卓也⁵⁾
Ryosuke KINOSHITA¹⁾, Daiki SATO²⁾, Hitoshi TAKIMOTO³⁾, Ryota TOBARI⁴⁾,
Jumpei YASUNAGA⁵⁾ and Takuya UEKI⁵⁾

ABSTRACT

In case of high-rise buildings, it is important to take measures to avoid vibration caused by wind. One of the measures is setting up the dampers in the buildings. Among them, the viscoelastic damper is effective for vibration caused by wind because it has effects against a small deformation. However, there is concern about changing the performance of it caused by long duration vibration. The purpose of this research is constructing a design method of vibration control buildings considered that the stud-type viscoelastic damper declines performance caused by long duration vibration. We propose the method for assessing the response of vibration control buildings considered that it declines performance by reducing its performance from the initial value.

Key Words: Vibration control structure, Viscoelastic damper, Performance decrement

1. はじめに

超高層建物において、風揺れの対策を立てることは必要不可欠である。その対策の一つとして、制振部材を建物に設置することが挙げられる。本報では、間柱型粘弾性ダンパーを対象とする。間柱型は配置の自由度が高く、ブレース型に比べ開口部を多く取れるなど、空間を有効に利用することが可能である。また、粘弾性ダンパーは微小な変形にも効果を発揮するため、風揺れの低減に有効であるが、多数回の繰り返し加振によりその特性が変化することが懸念される。そのため、粘弾性ダンパーの性能低下を考慮した耐風設計が必要である。しかし、風外力が数時間作用することを想定した場合、長時間の解析時間が必要になる上、一般的に風応答解析は複数の時刻歴応答解析の結果をアンサンブル平均する必要があるため、膨大な計算時間が必要になる。

本研究の目的は、間柱型粘弾性ダンパー(以降、ダンパー)の長時間の繰り返し加振による性能低下を考慮した制振建物の設計手法を構築することである。そこで、本報では10分間の風外力を使用して、数時間の台風を想定した長時間加振時の間柱型粘弾性ダンパーの性能低下を考慮することができる簡易的な応答評価手法を提案する。

¹⁾ 東京工業大学 環境・社会理工学院 大学院生 (〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

²⁾ 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授 (〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

³⁾ 元東京工業大学 環境・社会理工学院 大学院生 (〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

⁴⁾ JFE シビル 株式会社 (〒111-0051 東京都台東区蔵前 2-17-4)

⁵⁾ JFE スチール 株式会社 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-3)

2. 検討対象建物

検討対象建物は、鉄骨造 50 階建の事務所ビルとする⁵⁾。Fig.1(a)に検討建物モデルの軸組図、(b)に基準階伏図、Table1 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。軸組図の赤線、基準階伏図の赤丸はダンパーの設置位置を示す。X 方向を解析対象とし、主架構は弾性とする。主架構のみのモデルの総重量 W は 806,039 kN、1 次固有周期は 7.38 s である。構造減衰は主架構のみのモデルの 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。ダンパーを設置したモデルは 640 基のダンパーを設置しており、ダンパー量 α_{dl} は 0.6%となる。ここで、 α_{dl} はダンパー 1 基あたりの切片荷重を求め、それに第 1 層のダンパー設置基数をかけたものを、建物の総重量 W で除したものである。詳細については文献 9)を参照されたい。なお、本解析には構造計算プログラムである RESP-D を用いた。

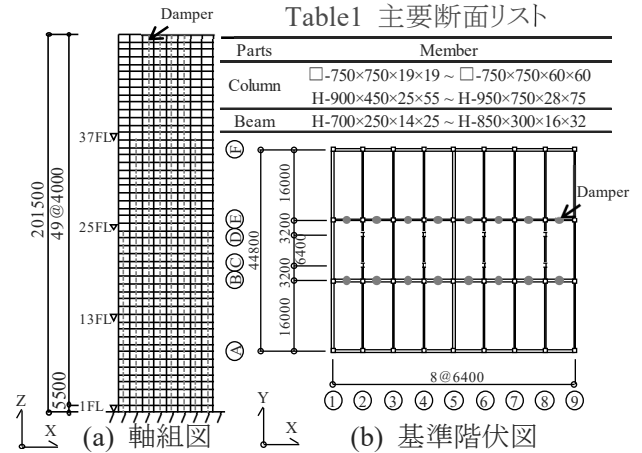


Fig.1 検討対象建物 [unit : mm]

3. 間柱型粘弾性ダンパー概要

3.1 本報で用いる間柱型粘弾性ダンパー

本報で用いる間柱型粘弾性ダンパーを Fig.2 に示す。支持柱および粘弾性パネルの諸元について、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連なっている。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。

3.2 ダンパー特性値

Fig.3 に等価せん断弾性率 G_{eq} 、等価減衰定数 H_{eq} の定義を示す。Fig.3 に示す τ_d 、 γ_d はそれぞれダンパーのせん断応力度、ダンパーのせん断ひずみであり、式(1)、(2)で表される。

$$\tau_d = F_d / A_s, \quad \gamma_d = u_d / d \quad (1, 2)$$

ここで、 F_d :ダンパー力、 A_s :粘弾性体断面積、 u_d :粘弾性体のせん断変位、 d :粘弾性体の厚さである。

粘弾性ダンパーは長時間の繰り返し加振により G_{eq} 、 H_{eq} (以下、ダンパー特性値) が低下するため、粘弾性ダンパーを用いた制振構造の設計の際には、ダンパー特性値の低下を考慮して設計する必要がある。特に、台風のように大きな外力が数時間にわたって作用する場合は特に注意が必要である。

4. 実大間柱型粘弾性ダンパーの長時間正弦波加振実験

4.1 実験概要

Fig.4 に長時間正弦波加振実験のセットアップ図を示す。粘弾性体のサイズは $A_s = 468512 \text{ mm}^2$ 、厚さ $d = 25 \text{ mm}$ とする。周囲の治具に熱が移動しないように、粘弾性パネルと上下取付具との接合部に 9 mm の断熱板を介して高力ボルト接合している。計測箇所は水平、鉛直変位に加え、粘弾性パネル内部の温度 (6 箇所) および支持柱部 (4 箇所)、雰囲気温度 (2 箇所) とする。サンプリング周波数は 50 Hz とする。载荷条件を Table2 に示す。载荷条件は振動

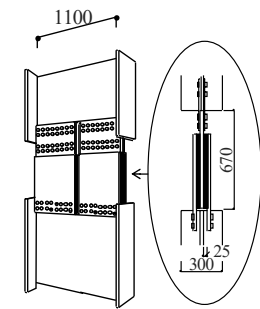


Fig.2 間柱型粘弾性ダンパー [unit : mm]

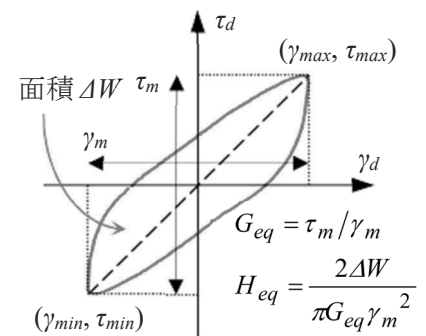


Fig.3 G_{eq} と H_{eq} の定義

数 $f = 0.10, 0.33, 2.00$ Hz, ダンパーのせん断ひずみ $\gamma_d = 50\%, 100\%, 200\%, 300\%$ の各組み合わせとする²⁾。計測時間も同時に示す。

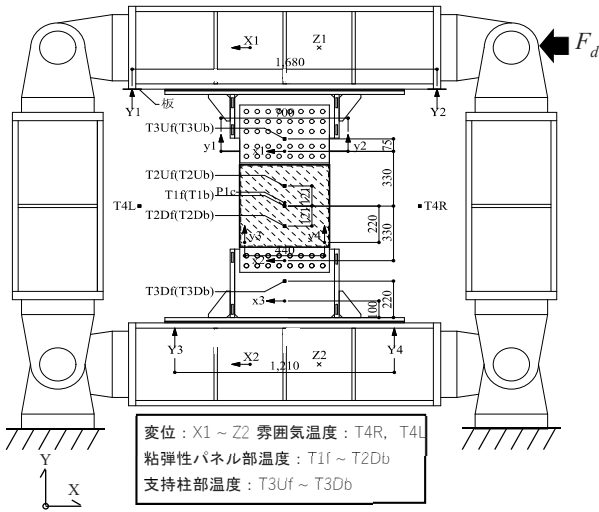


Fig.4 セットアップ [unit : mm]

Table2 载荷条件

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

4. 2 実験結果

Fig.5 に载荷条件が $f = 0.10$ Hz, $\gamma_d = 200\%$, $f = 0.33$ Hz, $\gamma_d = 100\%$, $f = 2.00$ Hz, $\gamma_d = 50\%$ の計 3 ケースにおけるダンパーせん断応力度 τ_d - ひずみ γ_d 関係を示す。Fig.5 より, いずれの振動数・ひずみの場合も繰返しによる τ_d の低下が確認できる。そこで, 等価せん断弾性率 G_{eq} および等価減衰定数 H_{eq} の低下率 $g_{\lambda\Omega}$, $h_{\lambda\Omega}$ とエネルギー密度 Ω の関係を Fig.6 に示す。エネルギー密度 Ω は式(3)で表される。

$$\Omega = W_d / V \quad (3)$$

ここで, W_d : ダンパーのエネルギー吸収量, V : 粘弾性体の体積である。

Fig.6 より, Ω に対する $g_{\lambda\Omega}$, $h_{\lambda\Omega}$ は振動数・ひずみによってばらつきがあるため, 低下の傾向に沿って近似式を作成し, Fig.6 に点線を示す。近似式は全実験結果の中央付近の値となる式(中央式)および下限値となる式(下限式)の 2 種類とする⁸⁾。本報では下限式のみを用い, 下限式は式(4), (5)で表される³⁾。

$$g_{\lambda\Omega} = \frac{0.018}{\Omega^{0.922} + 0.029} + 0.4, \quad h_{\lambda\Omega} = \frac{0.017}{\Omega^{1.06} + 0.05} + 0.65 \quad (4, 5)$$

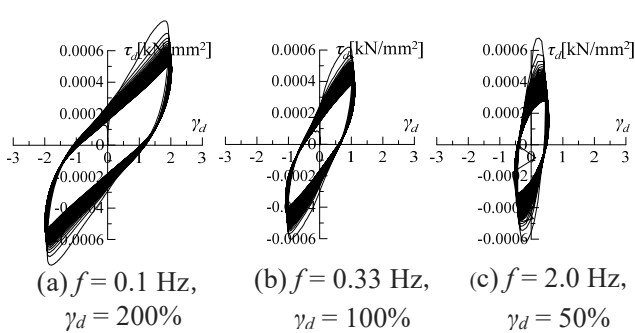


Fig.5 τ_d - γ_d 関係

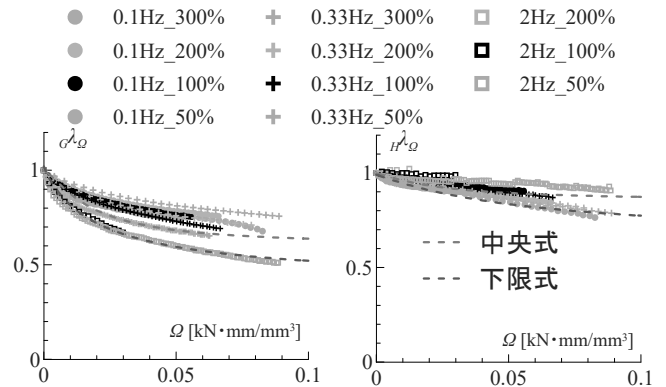


Fig.6 ダンパー特性値低下の傾向

5. 各種解析手法

本報では, 簡易手法, 精算手法を用いて風応答解析を行う。

簡易手法とは, ダンパー特性値の低下を考慮せずに応答解析を行い, 得られたダンパーのエネルギー吸収量 W_d から(3), (4), (5)式より $g_{\lambda\Omega}$, $h_{\lambda\Omega}$ を算出し, その低下率を初期値として再度解析を行う手法である⁴⁾。 W_d は各層のダンパー1基当たりのエネルギー吸収量の平均値を用いており, 値が最も大きい層の W_d を用いて全層一律に低下させ

ている。

精算手法とは、ステップごとに各ダンパーの W_d を算出し、(3)、(4)、(5)式より得られた $g\lambda_\Omega$ 、 $h\lambda_\Omega$ より、時々刻々とダンパー特性値を低下させながら解析を行う手法⁴⁾である。

6. 風応答解析

6.1 入力風外力概要

本報で用いる風外力は、基本風速 $U_0 = 36\text{m/s}$ 、再現期間 500 年とする。なお、風外力時刻歴波形は風洞実験⁶⁾より作成されて、時間は 10 分間と台風を想定した 3 時間⁵⁾とし、それぞれ 1 波ずつ使用する。なお、入力方向は風方向、風直交方向ともに X 方向 (Fig.1) とする。

6.2 特性変化を考慮しない場合の層間変形角

10 分間と 3 時間の風外力を用いて、間柱型粘弾性ダンパーの性能低下を考慮せずに風応答解析を行った。Fig.7 に最大層間変形角 R の高さ方向分布を示す。(a)は風方向、(b)は風直交方向である。10 分間の風外力、3 時間の風外力ともに概ね同等の値を示し、風方向で最大 0.007 rad、風直交方向で最大 0.01 rad 程度であり、そのときのダンパーの最大せん断ひずみはそれぞれ 0.60、1.20 である。

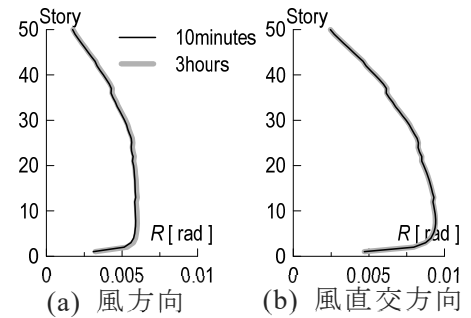


Fig.7 最大層間変形角

6.3 ダンパー特性値低下率の推定

以下に 10 分間の解析結果を用いて、3 時間後のダンパー特性値低下率を推定する方法 (簡易手法) を述べる。

Fig.8 に 10 分間の風外力を用いた際のダンパー 1 基当たりのエネルギー吸収量の高さ方向分布、Fig.9 にダンパー特性値低下率を示す。Fig.8 に示す 10 分間の風外力を用いた際のダンパー 1 基当たりのエネルギー吸収量 W_d を式(3)よりエネルギー密度 Ω に変換する。このときの W_d は、エネルギー吸収量が最も大きかった 5 層の値を用いる。このようにして算出された Ω は、10 分間の風外力を用いた風応答解析から得られた値であるため、その値を 18 倍して 3 時間の風外力を用いた風応答解析から得られる Ω を推定する。

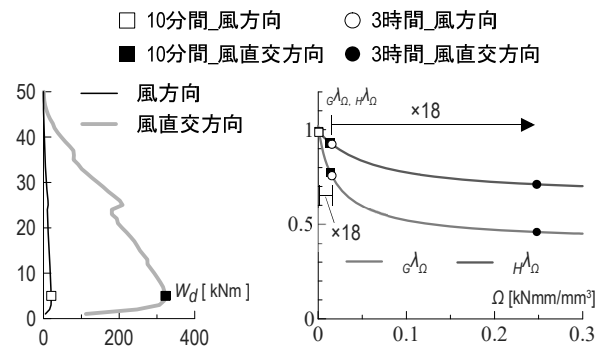


Fig.8 エネルギー吸収量 (10 分間)

Fig.9 特性値低下率

その値を用いて、式(4)、(5)より 3 時間後の $g\lambda_\Omega$ 、 $h\lambda_\Omega$ を推定する (Fig.9)。Fig.9 より、3 時間の風外力作用時に推定される $g\lambda_\Omega$ は風方向で 0.76、風直交方向で 0.46、 $h\lambda_\Omega$ は風方向で 0.92、風直交方向で 0.71 であった。

6.4 各種解析手法の比較

特性変化なし、簡易手法、精算手法の解析結果を比較する。簡易手法では、Fig.9 に示す 3 時間後の $g\lambda_\Omega$ 、 $h\lambda_\Omega$ の推定値を初期値として、再度 10 分間の風外力を用いて時刻歴応答解析を行った。精算手法では、3 時間の風外力を用いて、ダンパー特性値を時々刻々と変化させながら時刻歴応答解析を行った。Fig.10 に最大層間変形角 R の高さ方向分布を示す。(a)は風方向、(b)は風直交方向である。

Fig.10(a)より、風方向では特性変化なし、簡易手法、精算手法で概ね同等の値を示した。これは、風方向ではダンパー 1 基当たりのエネルギー吸収量が小さいため (Fig.8)、 $g\lambda_\Omega$ 、 $h\lambda_\Omega$ が大きく低下しないからであると考えられる (Fig.9)。

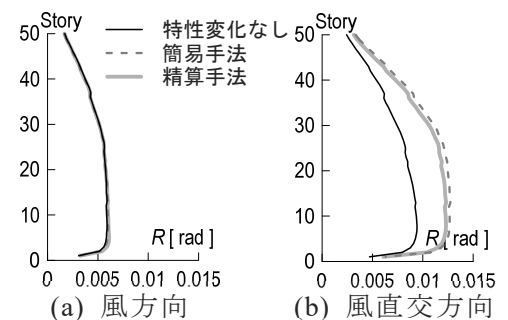


Fig.10 最大層間変形角

Fig.10(b)より、風直交方向では、特性変化なし、精算手法、簡易手法の順に大きな値を示し、精算手法は特性変

化なしに対して最大で 1.43 倍、簡易手法は精算手法に対して最大で 1.08 倍であった。ダンパーの性能低下を考慮した場合の応答は、考慮しない場合の応答よりも大きな値を示したため、台風のように大きな外力が数時間にわたって作用する場合は、ダンパーの性能低下を考慮して解析を行う必要があるといえる。また、簡易手法は精算手法よりも応答が大きいため、実際の建物応答よりも大きめに応答を評価してしまう可能性がある。しかし、10 分間の風外力での解析時間は約 3 時間で、簡易手法に必要な解析時間は 10 分間の風外力での解析を 2 回行うため約 6 時間であった。3 時間の風外力を使用する精算手法の解析時間は約 48 時間であるため、長時間の風外力を想定する場合、簡易手法は大幅に解析時間を短縮でき、かつ建物応答を安全側に評価することができる利点がある。

7. まとめ

台風を想定した長時間繰り返し加振時の間柱型粘弾性ダンパーの性能低下を考慮した風応答解析を行った。以下に本報で得られた知見を示す。

- (1) 風方向では、特性変化なし、簡易手法、精算手法で最大層間変形角は概ね同等の値を示した。これは、風方向ではダンパー1基当たりのエネルギー吸収量が小さく、台風を想定した長時間加振時でもダンパー特性値低下率 ($G\lambda_D$, $H\lambda_D$) が大きく低下しないからであると考えられる。
- (2) 風直交方向では、精算手法での最大層間変形角が特性変化なしに対して、最大で 1.43 倍になった。このことから、長時間の繰り返し加振時には粘弾性ダンパーの性能低下を考慮して解析を行う必要があることが確認された。
- (3) 風直交方向では、簡易手法での最大層間変形角が精算手法に対して、最大で 1.08 倍になった。このことから、簡易手法時の建物応答は、実際の建物応答よりも大きめに応答を評価してしまう可能性があることを確認した。
- (4) 10 分間の風外力での解析時間は約 3 時間で、簡易手法に必要な解析時間は 10 分間の風外力での解析を 2 回行うため約 6 時間であるのに対し、精算手法に必要な解析時間は約 48 時間である。このことから、3 時間の風外力を想定した場合、簡易手法は精算手法に対して、解析時間を約 1/8 に短縮することができた。

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。また、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。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 安永隼平, 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) 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: 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, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.221-224, 2020.3
- 4) 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56号, pp.59-62, 2018.2
- 5) 日本免震構造協会: 免震建築物の耐風設計指針, 2012.9
- 6) 丸川比佐夫, 大熊武司, 北村春幸, 吉江慶祐, 鶴見俊雄, 佐藤大樹: 風洞実験に基づく高層建物の多層

層風力によるエネルギー入力性状(その2 矩形高層建築物に作用する層風力特性), 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, pp.193-194, 2010.7

- 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) 樹下亮佑, 澤侑弥, 佐藤 大樹, 戸張 涼太, 吉永 光寿, 安永 隼平, 金城 陽介:履歴ダンパーを有する制振建物の実効変形比に着目した性能評価その1 部材構成モデルとせん断モデルの応答評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.925-926, 2020.9
- 9) 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