

シャンデリアの揺れを低減する制震システムの開発

Development of a Damping System that Reduce the Vibration of the Chandelier

木下 貴博 Takahiro Kinoshita*¹ 曽根 孝行 Takayuki Sone*²
飯田 正憲 Masanori Iida*³ 横並 努 Tsutomu Yokonami*⁴
長濱 健太 Kenta Nagahama*⁵

梗概

筆者らはシャンデリアの地震時の揺れを低減することができる2種の制震システムを提案した。この制震システムの特徴は、エネルギー吸収機構を天井スラブと天井材の間のみに設けた点である。これにより、シャンデリアの美観を損なうことなく効果的に揺れを低減することが可能となった。

提案した制震システムの振動台実験を行い、シミュレーション解析との比較を行った。ダンパーの摩擦を適切に考慮することで、実験結果と解析結果はよい対応を示した。

キーワード：シャンデリア、制震システム、振動台実験、画像解析

Summary

The authors proposed two types of damping systems that can reduce the response of chandeliers. The feature of these systems is that the energy dissipation system is placed only between the floor slab and the ceiling. Since this system is placed in the ceiling space, it does not distract from the appearance of the chandelier.

Shaking table tests of the proposed systems were performed and compared with the simulation by analytical model. The experimental results almost corresponded with the simulation by considering the effect of the friction of the dampers.

Keywords: chandelier, damping system, shaking table test, image analysis

1 はじめに

地震被害の一つとして非構造部材の損傷がある。2011年3月11日に発生した東日本大震災では、天井脱落の被害や設備機器の被害が数多く発生し^{例えば1), 2)}、非構造部材に対する耐震性を確保する必要性が認知された。天井の耐震化に関する対策は徐々に体系化されつつあるが、その他の非構造部材については十分とは言えない。

本論文ではシャンデリアを対象とした制震化対策方法を提案する。シャンデリアは、吹き抜けを有する大空間や天井高さの高い居室などに設置されることが多く、他の設備機器に比べて吊り長さが長い。シャンデリアの固有周期と建物の固有周期が近い場合、シャンデリアは建物の揺れに共振し大きく揺れる可能性がある。また、シャンデリアそのものの減衰能力は低く、地震時に揺れやすだけでなく揺れが収まるまでに長い時間を必要とする。地震時に建物の使用者に不安感を与える可能性がある他、最悪の場合、シャンデリアが落下し建物使用者が負傷する可能性もある。

シャンデリアの耐震対策としては、文献³⁾に示される振止め材を配置することで揺れを抑える方法がある。この方法は、シャンデリア自体を振止め材で固定する必要があるため、シャンデリアの外観に影響を与える。しかし、シャンデリアには美観性が強く求められるため、このような外観を害する対策は望ましくない。また、振止め材を固定したシャンデリア自体の強度が不足している可能性もあり、有効な対策となっていない場合も考えられる。

以上を背景に、筆者らはシャンデリアに効果的に減衰を付加できる制震システムを考案した。このシステムの特徴は、天井スラブと天井材間に対策箇所を限定している点であり、シャンデリア自体の外観を阻害することなく効果的に揺れを抑えることができる。以降では、提案する制震システムの概要を述べ、運動方程式を導く。次に、定点理論に基づき伝達関数の定点の振幅比が最小となる条件を整理し、伝達関数および時刻歴応答解析により効果を示す。

*1 技術研究所 研究員 Researcher, Research & Development Institute
*2 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute
*3 名古屋支店 設計部 課長 Manager, Design Department, Nagoya Branch Office
*4 名古屋支店 設計部 副部長 Deputy Senior Manager, Design Department, Nagoya Branch Office
*5 技術研究所 研究主任 Associate Chief Researcher, Research & Development Institute

最後に、振動台実験により本システムの効果を実証するとともに、解析結果と比較することで妥当性の検証を行う。なお、本システムは主にシャンデリアを対象として開発したものであるが、他の吊り物に対しても適用可能である。

2 制震システムの概要

2.1 制震システムの構成

Fig. 1 (a) に従来のシャンデリアの設置概要を示す。従来は、天井懐内に設けた架台からチェーンで吊ることが一般的である。チェーン自体に減衰能力が備わっていないため、揺れが収まるまでに時間を要する。一方提案するシステムは、Fig. 1 (b), (c) に示すように天井スラブと天井材間に設けたダンパーで振動を吸収する構成となっている。

Fig. 1 (b) のシステム（制震システム1）は、剛棒、剛体、ダンパーの3要素から構成される。天井材付近にピン接合を想定した支持点を持つことが特徴である。このシステムでは、適切な慣性モーメントが得られるように剛体の形状を設計する必要がある。Fig. 1 (c) のシステム（制震システム2）は、制震システム1を簡易化したものであり、剛体を設置しないことに加え、ピン接合の支持点天井スラブ付近に設けられているため、制震システム1にある架台を設ける必要がないことが特徴である。一方、剛体の慣性モーメントの効果を期待していないため、制震システム1と比べて制震効果は小さくなる。

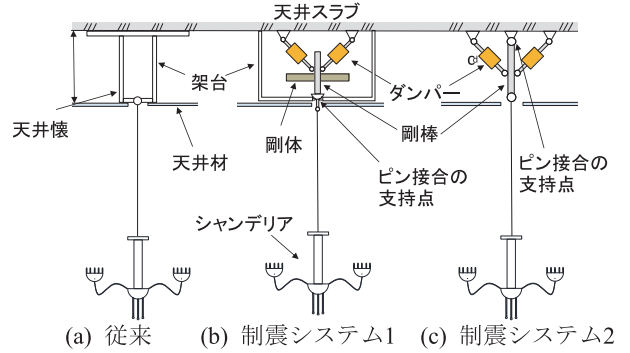


Fig. 1 制震システムの設置概要
Outline of the systems

2.2 制震システム1の運動方程式

Fig. 2 (a) に制震システム1のモデル図を示す。シャンデリアは1質点の振り子と見做す。O₁点まわりのモーメントの釣り合いを考え、 $\theta_1 \approx 0$ とくと (1) 式が導かれる。

$$M_1 \ddot{x}_1 + K_1(x_1 - x_2) = -M_1 \ddot{y}_0 \quad (1)$$

ここで、 $M_1 = m_1$ 、 $K_1 = m_1 g/L_1$ であり、シャンデリアの減衰はないものとした。

次に、O₂点まわりのモーメントの釣り合いを考え、 $\theta_1 \approx 0$ 、 $\theta_2 \approx 0$ と置くと (2) 式が得られる。

$$M_2 \ddot{x}_2 + C_2 \dot{x}_2 - K_1(x_1 - x_2) + K_2 x_2 = -\eta M_2 \ddot{y}_0 \quad (2)$$

ここで、

$$\alpha = -L_3/L_2, \quad \beta = L_1/L_2, \quad M_2 = \alpha^2 m_2 + I_2/L_2^2, \quad K_2 = \alpha m_2 g/L_2 + \beta K_1, \quad \eta = \alpha m_2/M_2, \quad C_2 = 2C_d \cos^2 \varphi_1 (L_4/L_2)^2 \text{ とした。}$$

(1) 式と (2) 式をまとめて状態方程式の形で表すと (3) 式が求まる。

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{y}_0 \quad (3)$$

ここで、 $M = \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix}$ 、 $C = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix}$ 、 $K = \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 \\ -K_1 & K_1 + K_2 \end{bmatrix}$ である。また、 0 および I は 2×2 の零行列と単位行列を表す。

2.3 制震システム2の運動方程式

Fig. 2 (b) に制震システム2のモデル図を示す。制震システム1と同様にシャンデリアは1質点の振り子と見做す。O₁点まわりのモーメントの釣り合いを考え、 $\theta_1 \approx 0$ とくと (4) 式が導かれる。

$$-M_1(\ddot{x}_1 + \ddot{y}_0) = K_1(x_1 - x_2) \quad (4)$$

ここで $M_1 = m_1$ 、 $K_1 = m_1 g/L_1$ であり、シャンデリアの減衰はないものとした。

次にO₂点まわりのモーメントの釣り合いを考え、 $\theta_1 \approx 0$ 、 $\theta_2 \approx 0$ とくと (5) 式が得られる。

$$-M_1(L_1 + L_2)(\ddot{x}_1 + \ddot{y}_0) = C'_2 L_2 \dot{x}_2 + M_1 g \dot{x} \quad (5)$$

ここで $C'_2 = 2C_d \cos^2 \phi_1 (L_3/L_2)^2$ である。

(4) 式を (5) 式に代入して $(\ddot{x}_1 + \ddot{y}_0)$ の項を消去し、これと (4) 式を状態方程式の形で表すと (6) 式が得られる。

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ K_1/C'_2 & -(\beta + 1)K_1/C'_2 & 0 \\ -K_1/M_1 & K_1/M_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} y_0 \quad (6)$$

ここで $\beta = L_1/L_2$ である。

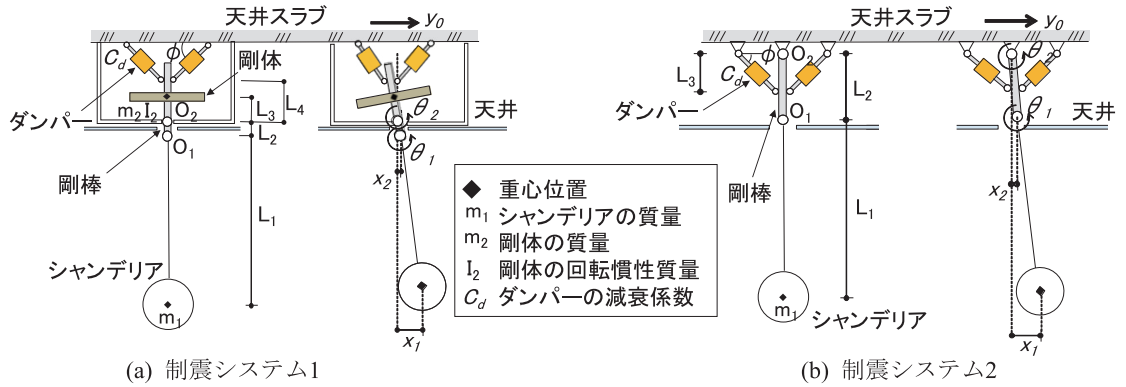


Fig. 2 制震システム
Diagram of the systems

3 定点理論に基づく最適パラメータの検討

(3) 式および (6) 式から求まるシステム全体の伝達関数には、ある円振動数において調和振動に対する振幅比が減衰係数 (C_2 , C'_2) に依らず一定値となる定点が存在する。このような定点の存在は「定点理論」⁴⁾ として知られている。本章では、この定点理論に基づき、システム毎に定義する最適状態を実現するためのパラメータを導出する。なお以降では、ダンパーによる得られる減衰係数 ((3) 式の C_2 , (6) 式の C'_2) の表記を統一して減衰係数 C とする。

3.1 制震システム1の最適パラメータ

制震システム1の最適状態を、定点理論に基づき求まる2つの定点の振幅比の大きさを揃えた状態で、適切な減衰係数を設定することで伝達関数の振幅比の最大値を最小化する状態と定義する。以下では、その条件を導出する。

(3) 式において天井スラブの調和振動 $y_0 = Y_0 e^{i\omega t}$ による定常応答を $x_1 = X_1 e^{i\omega t}$, $x_2 = X_2 e^{i\omega t}$ とおく。振幅 Y_0 に対する振幅比 $|X_1/Y_0|$ を考えると、ある円振動数 ω に対して振幅比 $|X_1/Y_0|$ の値が減衰係数 C の値によらず一定値となる定点が存在する。この時の円振動数 ω と振幅比 $|X_1/Y_0|$ の値は (7), (8) 式で求められる。

$$\omega = \sqrt{\frac{(\mu + \varphi) \pm \sqrt{(\mu - \varphi)^2 + 2\mu}}{2\mu}} \omega_1 \text{ の時,}$$

$$|X_1/Y_0| = |(\mu - \varphi + 1) \pm \sqrt{(\mu - \varphi)^2 + 2\mu}| \quad (7)$$

$$\omega = \sqrt{1 + \frac{1}{\eta\mu}} \omega_1 \text{ の時,}$$

$$|X_1/Y_0| = \eta\mu + 1 \quad (8)$$

ここで、 $\omega_1 = \sqrt{K_1/M_1}$, $\omega_2 = \sqrt{K_2/M_2}$, $\Psi = \omega_2/\omega_1$, $\mu = M_2/M_1$, $\varphi = (2\mu\Psi^2 + \eta\mu + 2)/2$ とした。ここで (7) 式による2つの定点をP点およびQ点, (8) 式による定点をR点と呼ぶこととする。

P点とQ点の振幅比が同じ大きさとなる条件は, (7) 式より $\mu - \varphi + 1 = 0$ であり, 整理すると (9) 式で表される。

$$\psi = \sqrt{1 - 0.5\eta} \quad \eta < 2 \quad (9)$$

この条件を満たす時の定点の値は (10) 式で表される。

$$(\omega, |X_1/Y_0|)_{P,Q} = \left(\sqrt{\frac{(2\mu+1) \pm \sqrt{(2\mu+1)}}{2\mu}} \omega_1, \sqrt{(2\mu+1)} \right) \quad (10)$$

$\eta\mu + 1 < \sqrt{2\mu+1}$ の関係が成り立つ時, (10) 式の振幅比は (8) 式のR点の振幅比よりも大きくなる。なお, m_1 , m_2 , L_1 , L_2 , L_3 の値を決めると, (9) 式を満たすために必要となる慣性モーメント I_2 の値は (11) 式より求められる。

$$I_2 = m_1 L_1 L_2 + m_2 (L_1 + 0.5L_2 - L_3) L_3 \quad (11)$$

上式を満たした上で適切な減衰係数Cを与えた場合, 伝達関数の振幅比の最大値を最小化する伝達特性を実現できる。この減衰係数Cの導出は煩雑なため, 本論文では数値計算で求めることとする。

3.2 制震システム2の最適パラメータ

制震システム2の最適状態を定点理論に基づき求まる1つの定点の振幅比を最小化する状態と定義し, その条件を導出する。(6) 式において天井スラブの調和振動 $y_0 = Y_0 e^{i\omega t}$ による定常応答を $x_1 = X_1 e^{i\omega t}$, $x_2 = X_2 e^{i\omega t}$ とおき, 振幅 Y_0 に対する振幅比 $|X_1/Y_0|$ を考えると, ある円振動数 ω に対して振幅比 $|X_1/Y_0|$ の値が減衰係数Cの値によらず一定値となる定点が存在する。その時の円振動数 ω と振幅比 $|X_1/Y_0|$ の値は (12) 式より求まる。

$$\omega = \sqrt{1 - 0.5/(\beta + 1)} \omega_1 \quad (12a)$$

$$|X_1/Y_0| = 2\beta + 1 \quad (12b)$$

ここで, $\omega_1 = \sqrt{K_1/M_1}$ とした。

また, (12) 式による定点をP点と呼ぶこととする。ここで, 定点Pの振動数 ω に対する伝達関数の極値が (12b) 式と一致するという条件から, 定点の振幅比が最小となるための減衰係数が (13) 式で求まる。

$$C = (1 + \beta) \sqrt{\frac{2\beta}{2\beta+1}} \omega_1 M_1 \quad (13)$$

4 制震効果の解析的検討

本章では, 検討モデルの伝達関数を用いて本システムの特性を確認し, 時刻歴応答解析により制震効果を検証する。

4.1 検討用モデルと伝達関数

Table 1に検討モデルの諸元を示す。シャンデリアの質量は15kg, 吊り長さは1570mmとした。制震システム1の剛体の質量はシャンデリアの質量の2倍とし, 式 (11) より求まる慣性モーメントの値を用いた。また, 減衰係数Cは最適状態に近い特性となるように数値計算により求めた。

Table 1 検討モデルの諸元
Property of study model

諸元	m_1 (kg)	m_2 (kg)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	φ (°)
制震システム1	15	30	1570	200	70	45
制震システム2		—		600	300	

Fig. 3に伝達関数を示す。黒線は減衰係数 $C = \infty$ (吊り長さ L_1 の振り子) を, 黒点線は $C = 0$ (吊り長さ $L_1 + L_2$ の振り子) を表す。Fig. 3 (a) に示すように, 制震システム1の定点 (P点およびQ点) は $C = 0$ と $C = \infty$ の伝達関数の2つの交点と一致している。赤線で示す最適状態の伝達関数では, この2つの交点の振幅比 $|X_1/Y_0|$ が同じ高さで, 定点付近の振幅比が最大となる伝達特性になっている。Fig. 3 (b) に示すように, 制震システム2の定点 (P点) は $C = 0$ と $C = \infty$ の伝達関数の交点と一致している。赤線で示す最適状態の伝達関数では, その定点の振幅比 $|X_1/Y_0|$ が全周波数領域で最大となっている。

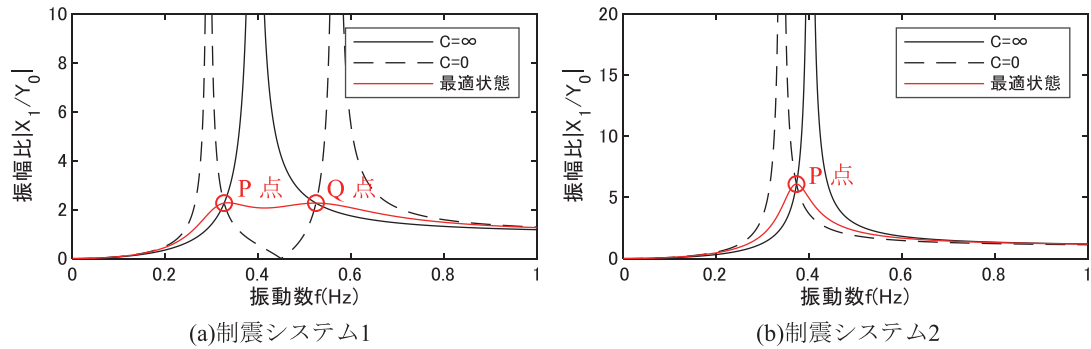


Fig. 3 伝達関数
Transfer function

4.2 時刻歴応答解析

検討モデルへの入力波は、建物モデルの応答波とする。建物モデルは、文献⁵⁾に示す24階建てのS造ホテルの短辺方向を想定した等価せん断モデルとする。短辺方向の1次固有周期は2.55秒であり、対象とするシャンデリアの固有周期（2.51秒）と近接しており、共振による応答増幅が想定される。

建物モデルへ入力する地震動は、1995年兵庫県南部地震のJMA神戸（NS方向）⁶⁾ および国交省の基盤促波CH1⁷⁾を採用した。建物モデルの時刻歴応答解析から得られた4階の応答波を検討モデルへの入力波とする。これは一般的なホテルの低層部にあるロビーから見えるシャンデリアを想定した入力である。検討モデルへの入力波をFig. 4に示す。

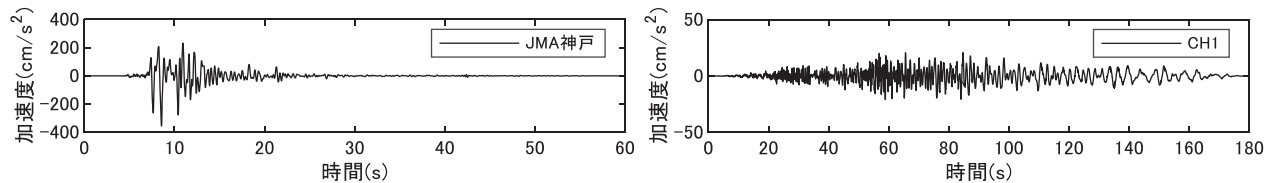


Fig. 4 検討モデルへの入力波
Input waves to the studied model

Fig. 5に時刻歴応答解析から得られたシャンデリアの変位波形を示す。比較のために対策なしの従来のシャンデリアを模擬した1質点モデル（ $h=0.5\%$ ）の解析も実施した。制震システム1では、JMA神戸の最大変位の低減率が約45%，CH1では約85%であった。一方制震システム2では、JMA神戸の最大変位の低減率が約18%，CH1では約61%であった。このように、制震システム1の方がより効果が高い。地震動の性質による違いに着目すると、パルス性地震動であるJMA神戸に比べて、長周期地震動であるCH1に対する効果が高く、ダンパーがより有効に機能していることが分かる。

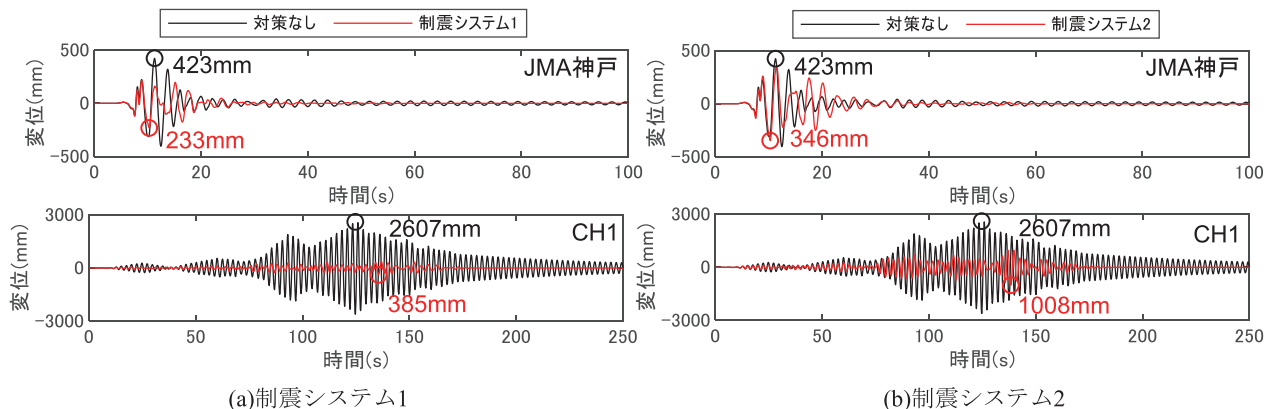


Fig. 5 解析結果
Analysis results

5 制震効果の実験的検証

本章では、実物のシャンデリアを用いた振動台実験を行い、提案する制震システムの実現性を検討する。

5.1 試験体の概要

Fig. 6, Fig. 7に試験体の概要を示す。試験体はTable 1の諸元を満たすように構成した。制震システム1の主な構成要素は、シャンデリア、剛体、剛棒、球面軸受け、オイルダンパーである。鉄骨フレームにH鋼2本を同レベルに取り付け、その上に $\phi 50$ の穴を中心にした鉄板を取り付けた。この鉄板上に球面軸受けを設けることで、Fig. 2のO₂点に対応するピン接合を構成した。制震システム2の主な構成要素は、シャンデリア、剛棒、オイルダンパーである。両システムに共通するオイルダンパーは、実用展開時のコストを考慮して引張方向にのみ減衰力を発揮する市販品の片効きタイプを使用し、2本で両効き1本分の特性とした。減衰係数Cは、最適状態の時の値と同等程度になるように、ダンパーの減衰力および設置角・設置位置で調整をした。

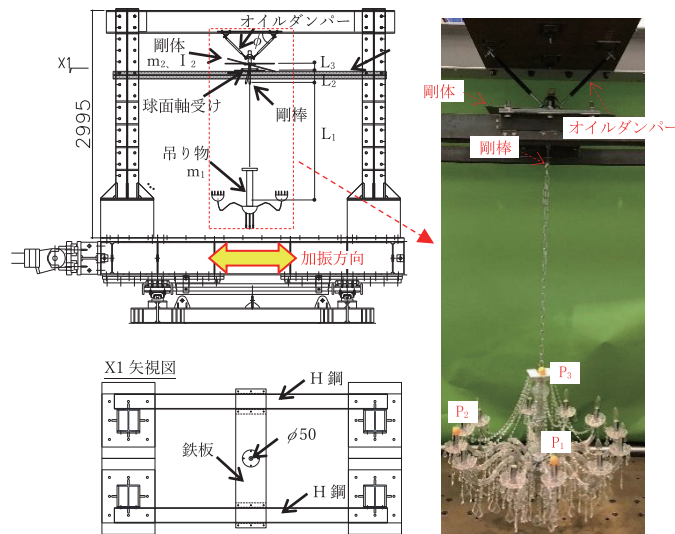


Fig. 6 試験体概要 (制震システム1)
Outline of specimen (system 1)

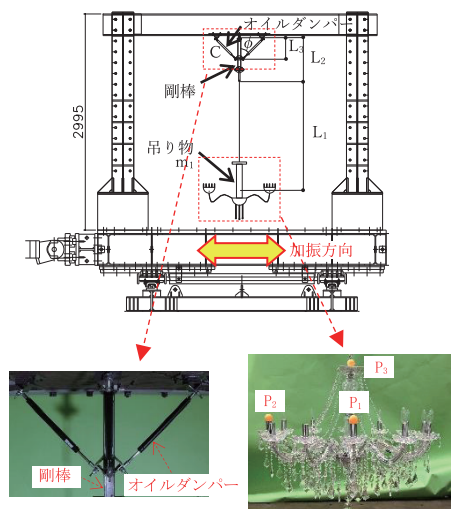


Fig. 7 試験体概要 (制震システム2)
Outline of specimen (system 2)

ダンパーの減衰特性を確認するため、様々な振動数や振幅の正弦波を与えて性能を確認した。Fig. 8に代表例として0.4Hzの正弦波を与えた時の荷重-変位関係を示す。ダンパーの引張方向が+、圧縮方向が-である。圧縮方向において10N前後の荷重が生じていることが分かる。変位の1階微分から速度を求め荷重-速度関係の形で表すとFig. 9のようになる。圧縮方向の動き出し後には、10N前後の荷重が生じており摩擦の影響と推察される。一方、引張方向では概ね線形の特徴を持つダンパーであることが分かる。

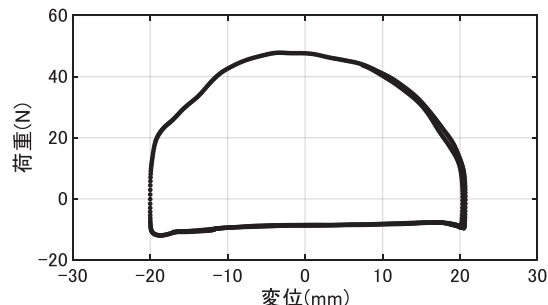


Fig. 8 ダンパーの荷重-変位関係 (0.4Hz)
Relationship between load and displacement of the damper

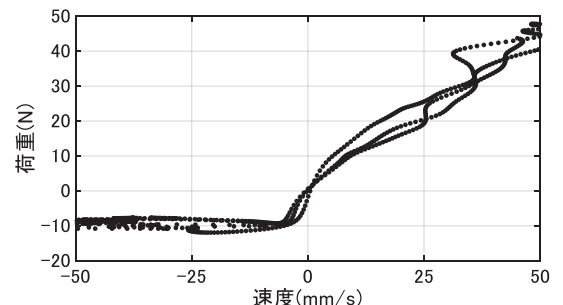


Fig. 9 ダンパーの荷重-速度関係 (0.4Hz)
Relationship between load and velocity of the damper

5.2 加振概要と実施ケースおよび計測概要

振動台に取り付けた1000kNアクチュエータにより、Fig. 6およびFig. 7に示す方向に1方向加振した。加振波は前章で述べた建物モデルの4階の応答波 (JMA神戸, CH1) とした。各加振波の入力レベルは、対策なしのシャンデリア (試験体のダンパー部分をアングル材に交換し、動かないように固定した試験体) の最大変位が200mm程度

となる大きさに調整した。実施ケースは、制震システム1、制震システム2、対策なしの3ケースとする。

本実験では、画像解析によりシャンデリアの変位を計測した。画像解析に用いるターゲットは、シャンデリアの平面内における回転の影響が小さく、かつ高さが重心位置に近いFig. 6, 7のP₂を用いた。画像解析にはTAMA 2Dを使用した。計測用カメラの画面解像度を1980×1080, FOV(視野角)を挟角、フレームレートを60fpsとした。レンズキャリブレーションについては、計測する画角において実験前に実施した。

5.3 制震システム1の実験結果

Fig. 10に制震システム1と対策なしの場合の実験結果の比較を示す。最大変形を比較すると、本システムによる応答低減効果が表れているが、自由振動部分の減衰傾向が対策をしない場合と同程度である。ダンパーの圧縮方向で見られた摩擦の影響を踏まえると、シャンデリアの振動が小さい時にダンパーの減衰力が有効に発揮されていない可能性が考えられる。そこで、Fig. 11にダンパーの摩擦を考慮した解析結果と実験結果を比較して示す。自由振動部分の位相や最大変位ともにより解析で再現できていることが分かる。

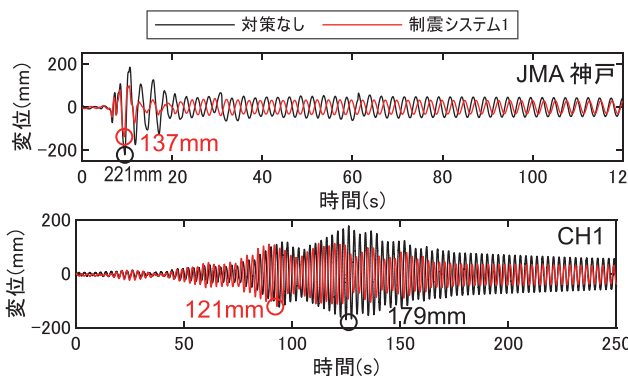


Fig. 10 実験結果の比較(制震システム1と対策なし)
Comparison of experiment results

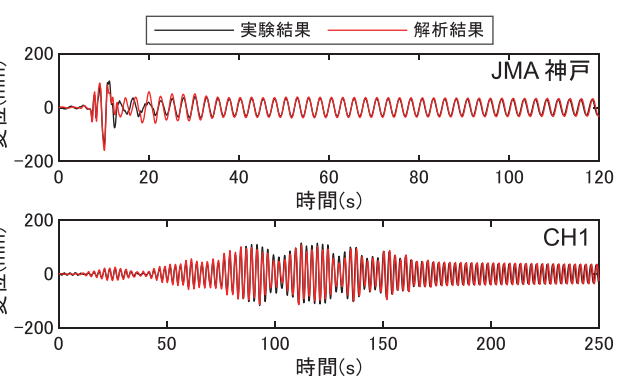


Fig. 11 実験結果と解析結果の比較
Comparison of experiment and analysis

5.4 制震システム2の実験結果

Fig. 12に制震システム2と対策なしの場合の実験結果の比較を示す。最大変形を比較すると、JMA神戸の結果では効果が小さいが、CH1では半分程度まで低減している。一方、小振幅時には制震システム1と同様にダンパーの摩擦の影響により想定している効果が十分に得られていない可能性がある。

摩擦の影響を解析に考慮することで実験と解析が良く対応することは前節で述べた。制震システム2でも同様の傾向は確認できているが、試験体の特性を確認する上では伝達関数による比較も重要である。しかし、ダンパーの摩擦の影響により自由振動部分の時間が非常に長く、変位波形のFFTから伝達関数をきれいに求めることができない。したがって制震システム2では、振動台を正弦波加振し、試験体が定常状態になった時のシャンデリアと振動台の各振動数における変位比から伝達関数を求め、解析結果と比較した。正弦波の振動数は0.2~0.5Hzまでを0.01Hz刻みで変動させた。Fig. 13に解析から求めた伝達関数と実験結果を比較して示す。実験結果は試験体の特性をよく再現できており、シャンデリアの振幅が大きく摩擦の影響が相対的に小さい場合には、理論値と整合することが確認できた。

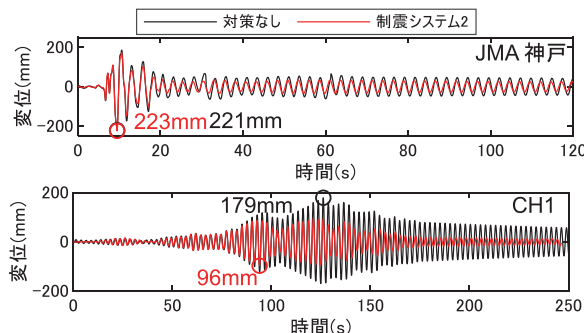


Fig. 12 実験結果の比較(制震システム2と対策なし)
Comparison of experiment results

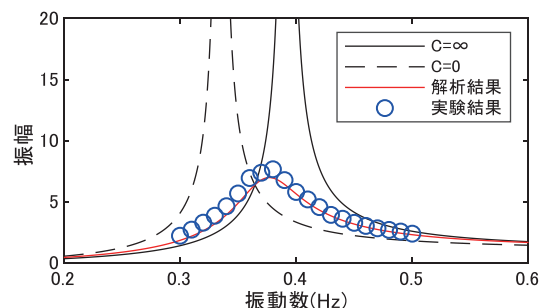


Fig. 13 伝達関数の比較
Comparison of transfer function

6 ダンパーの摩擦力を考慮した制震効果の解析的検討

前章の検討から、ダンパーの摩擦の影響を考慮することでシャンデリアの応答を適切に評価できることを確認した。一方、対策なしの場合のシャンデリアの変位が200mm程度になるように入力レベルを下げたため、相対的に動き出しに対する摩擦の影響が大きく表れる結果であったと考えられる。本章では、4.2節で用いた実応答波レベルの入力波を用いて、大きい振幅レベルで摩擦の影響が問題となりうるか解析的に検討する。

Fig. 14にダンパーの摩擦を考慮した場合と考慮しない場合の解析結果の比較を示す。入力地震動は、4.2節で用いた建物モデルの4階の応答波とした。制震システム1では、振幅の大きい部分では考慮しない場合と比較しても応答に大きな差はみられないが、自由振動部分に代表される小振幅領域では摩擦の影響が大きい。制震システム2においてもその傾向は変わらない。本論で用いたダンパーの摩擦レベルであれば、振幅が大きい領域においては解析で想定している効果が期待できるものと考えられる。

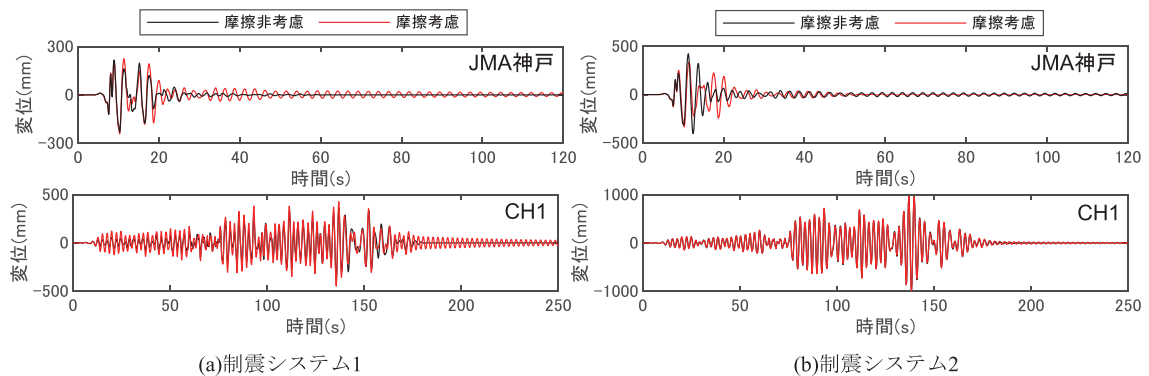


Fig. 14 解析結果の比較（ダンパーの摩擦の有無）
Comparison of analysis results

7 まとめ

本報では、シャンデリアの美観を阻害することなく地震時の揺れを低減することが可能な制震システムを提案した。制震効果を時刻歴応答解析および振動台実験により検証した。以下にまとめを示す。

- (1) 提案する2つの制震システムに関して運動方程式を示し、それぞれ最適状態となるパラメータを示した。
- (2) 時刻歴応答解析による制震効果の検討から、パルス性地震動のJMA神戸に比べて、長周期地震動であるCH1に対する効果が高かった。この時の最大変位の低減率は最大で約85%であった。
- (3) 振動台実験の結果と解析結果を比較した。解析においてダンパーなどの摩擦の影響を考慮することで、実験結果の傾向をよくとらえることができた。
- (4) 実応答波レベルの解析的検討から、振幅の大きい領域ではダンパーの摩擦の影響が小さいことを確認した。極力摩擦力の小さいダンパーを用いることで小さい振幅での制震効果も高まるものと考えられる。シャンデリア自体のコストとの費用対効果を勘案して最適なダンパーを選定していく必要があると思われる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：東日本大震災合同調査報告書 建築編6 非構造部材，2019
- 2) 日本建築学会：非構造部材（屋根，外壁，天井）の地震・風による被害の軽減化の研究，2008
- 3) 日本建築設備・昇降機センター：建築設備・昇降機耐震診断基準及び改修指針，1996
- 4) J. P. Den Hartog: Mechanical Vibration, 4th edition, McGraw-Hill, New York, 1956
- 5) T. Kinoshita, et al. : PROPOSAL OF DAMPING SYSTEMS FOR CHANDELIERS. 16th World Conference on Seismic Isolation, 1-6 July 2019, Saint Petersburg, Russia
- 6) 気象庁：強震波形（平成7年（1995年）兵庫県南部地震），https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/hyogo_nanbu/index.html,（最終確認日2020.08.05）
- 7) 国立研究開発法人建築研究所：長周期地震動対策にかかわる技術資料・データ公開特設ページ，<https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/lpe/index.html>,（最終確認日2020.08.05）