

鉄骨系高層建物における板バネを利用した振り子式TMDの適用とその制振効果の確認

Application of a Pendulum-type Tuned Mass Damper Utilizing Flat Springs to a High-rise Steel Building and Confirmation of its Vibration Control Performance

曾根 孝行 Takayuki Sone*¹ 山本 雅史 Masashi Yamamoto*² 濱口 弘樹 Hiroki Hamaguchi*³
齋藤 悠磨 Yuuma Saito*⁴ 大嶋 隆 Takashi Ohshima*⁵ 村田 耕司 Kouji Murata*⁶

梗概

鉄骨系高層建物において、強風時の居住性能を確保するためTMDを設置した。1～2cm/s²程度の小さな建物の揺れからTMDに制振効果を発揮させるためには、マスの支持機構から生じる摩擦抵抗の大きさを極力小さくする必要がある。そこで本TMDでは、板バネを利用した振り子式支持機構を採用した。本建物において人力加振などの振動実験を行い、本TMDによる制振効果を確認した。

キーワード：高層建物，居住性能，振り子式TMD，常時微動計測，加振実験

Summary

We applied a Tuned Mass Damper (TMD) to a high-rise steel building to secure its habitability during strong winds. In order to show the vibration control performance of a TMD from small accelerations about 1 to 2 cm/s², it is necessary to reduce the friction that occurs from the mass support mechanism. In this case, a pendulum-type support mechanism utilizing flat springs was adopted as the mass support mechanism. Excitation experiments, such as human-powered excitations etc., were conducted at this building and the vibration control performance of the TMD was confirmed.

Keywords: high-rise building, habitability, pendulum-type TMD, microtremor measurements, excitation experiments

1 はじめに

台風などの強風により生じる高層建物の揺れは、大きさが数cm/s²程度と小さいが長く揺れ続けるため、居住者に不快感を与えやすい。建物を設計する際には地震に対する耐震性能と共に、強風に対する居住性能を確保することが重要である。一般に、アスペクト比（建物幅に対する建物高さの比率）が大きな建物ほど居住性能を確保することが困難となる。その様な建物では、対応策としてTMDなどの制振装置を設置することが多い。TMDはマス（錘）とバネ，ダンパーから構成される制振装置である。屋上に設置し，TMDの振動数が建物の振動数に同調する様にバネの硬さなどを調整することで，強風時の建物の揺れを効果的に低減することができる。

居住者が不快に感じ始める建物の揺れの大きさは数cm/s²程度と小さい。そのため，TMDは1～2cm/s²程度の揺れから制振効果を発揮できることが望ましい。しかしTMDが動く際，マスの支持機構やダンパーからは無視できない大きさの摩擦抵抗が生じる。摩擦抵抗の大きさによってはTMDが必要な時に十分な制振効果を発揮できない，又は動くことすらできないことも有り得る。そのためTMDを設計する際，摩擦抵抗を小さくすることは重要な課題となる。

マスの支持機構の一つに板バネを利用した振り子式支持機構がある。この支持機構はTMDが動く際の摩擦抵抗の発生箇所がほとんどなく，摩擦抵抗が非常に小さい。また，他の支持機構で使用されるベアリングなどの工業製

*1 技術研究所 研究主任 Associate Chief Researcher, Research & Development Institute
*2 技術研究所 地震工学部長 博士(工学) General Manager, Research & Development Institute, Dr. Eng.
*3 技術研究所 地震工学部 振動制御グループ長 Group Leader, Research & Development Institute
*4 東京本店設計部 構造担当 Structural Design Department
*5 タイ竹中 構造設計部長 Senior Manager, Structural Design Department
*6 東京本店設計部 構造3グループ長 Group Leader, Structural Design Department

品を使用せず、大部分が躯体工事の一部として製作できることから、TMDがローコストで実現できる。

板バネを利用した振り子式TMDの適用はこれまでも行われてきたが、その詳細に関する報告は少ない。その様な中、今回筆者らは建物高さ約34mの鉄骨系高層建物において、居住性能を確保するため板バネを利用した振り子式TMDを設置した。本TMDの制振効果を確認するため、人力加振などの加振実験を行った。以下では、本TMDの概要とその制振効果に関する実験結果を報告する。

2 建物概要

本建物は東京都内に建つ高さ約34m（屋上工作物を除く）の10階建て事務所である（Fig. 1）。建物短辺方向のアスペクト比は約4と大きい。

建物諸元をTable 1に示す。本建物は強風時の居住性能を確保するためにTMDを設置した他、地震時の耐震性能を向上させるため、建物の浮き上がりを許容して建物に伝わる地震エネルギーを低減させるス

Table 1 建物諸元
Specifications of the building

建物外形	長辺約22.7m×短辺約8.5m×軒高約34.4m
建物階数	地上：10階 地下：1階
構造形式	地上：S造 地下：SRC造 基礎：場所打ちRC杭（最大杭長16.5m）
設計振動数 （設計固有周期）	長辺方向（X方向）：0.91Hz（1.10s） 短辺方向（Y方向）：0.76Hz（1.31s） 振れ：0.89Hz（1.12s）
設計時の有効重量と 有効回転慣性重量 （R階を基準）	長辺方向（X方向）：5,550kN 短辺方向（Y方向）：5,530kN 振れ：2.72×10 ⁶ kN・m ²

テッピング制震構造¹⁾を採用したことが特徴である。

設計時の居住性能の評価は10階を対象とし、日本建築学会の指針に準じて行った^{2), 3)}。風外力の条件としては、地表面粗度区分Ⅱの場合の地上から10m位置での再現期間1年の風速を18m/s、建設地の地表面粗度区分をⅣと設定し、東京都で発生頻度の高い南北方向の風を考慮した。建物の振動数の値はTable 1に示した設計時（=安全性能評価時）の値の1.2倍に、減衰定数の値は上部構造の構造形式と建物高さを考慮して1.5%に設定した⁴⁾。また、振れの評価位置は建物最外端とした。

設計時の居住性能の評価結果をFig. 2に示す。アスペクト比の大きな短辺方向（Y方向）はH-70のラインを超えた。長辺方向（X方向）はH-50のライン程度、振れはH-10のライン程度となった。H-70のラインを超えたY方向の居住性能を改善するため、TMDを1台設置することとした。

3 TMDの概要

本建物に設置したTMDの概要をTable 2とFig. 3に示す。TMDの設置位置はR階である。

本TMDのマスは、コンクリートマスとマス架台から成り立っている。マス重量は78.5kNであり、Table 1に示したY方向の建物有効重量に対する比は約1.4%である。マスは厚さ16mm、幅350mmの鋼板4枚を用いてフレームから吊り



Fig. 1 建物パース
Perspective of the building

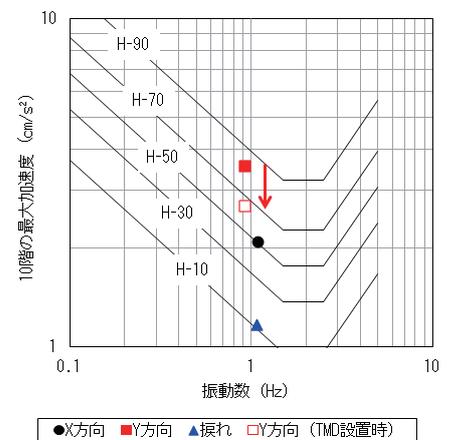


Fig. 2 設計時の居住性能の評価結果
Estimation results of habitability at 10th floor in the design stage

Table 2 TMDの諸元
Specifications of the TMD

マス重量	78.5kN
マスの支持機構	板バネ（鋼板）を利用した平行振り子式支持
振動数（周期）	0.83Hz（1.20s）
最大ストローク	±60mm（バッファストローク±50mmを含む）
復元力機構	板バネ（鋼板）
減衰機構	オイルダンパー（2本）
バッファ機構	ゴムバッファ（4体） オイルバッファ（4体）

下げられている。4枚の鋼板は板バネとして働くため、一方向に動くことが可能な平行振り子を形成したことになる。鋼板の長さは重力による復元力も考慮し、TMDの振動数が0.83Hz（周期1.20s）となる様設定した。本支持機構はTMDが動く際の摩擦抵抗の発生箇所がほとんどなく、摩擦抵抗は非常に小さいと考えられる。

TMDの動く方向は制振対象であるY方向に合わせた。TMDの減衰機構としてオイルダンパーを設置した。また、地震時のバッファ機構としてゴムバッファとオイルバッファを設置した。

TMDが制振効果を発揮するためには、TMDの振動数を建物の振動数に同調させる必要がある。一般的にはTMDにコイルバネを別途付加することでTMDの振動数を調整する。

これに対して本TMDでは、板バネの長さを調整することでTMDの振動数を同調させることとした。板バネの長さの調整は、板バネの下端を鋼製ブロック（以下、剛性調整ブロック）で挟み込み、固定端高さ位置を上方へ移動させることで行った。剛性調整ブロックの設置個数によって板バネの固定端高さ位置を任意に変えることができる。本TMDではPhoto 1に示す3パターンの設置状況（剛性調整ブロックを設置しない場合も含める）を設定した。この

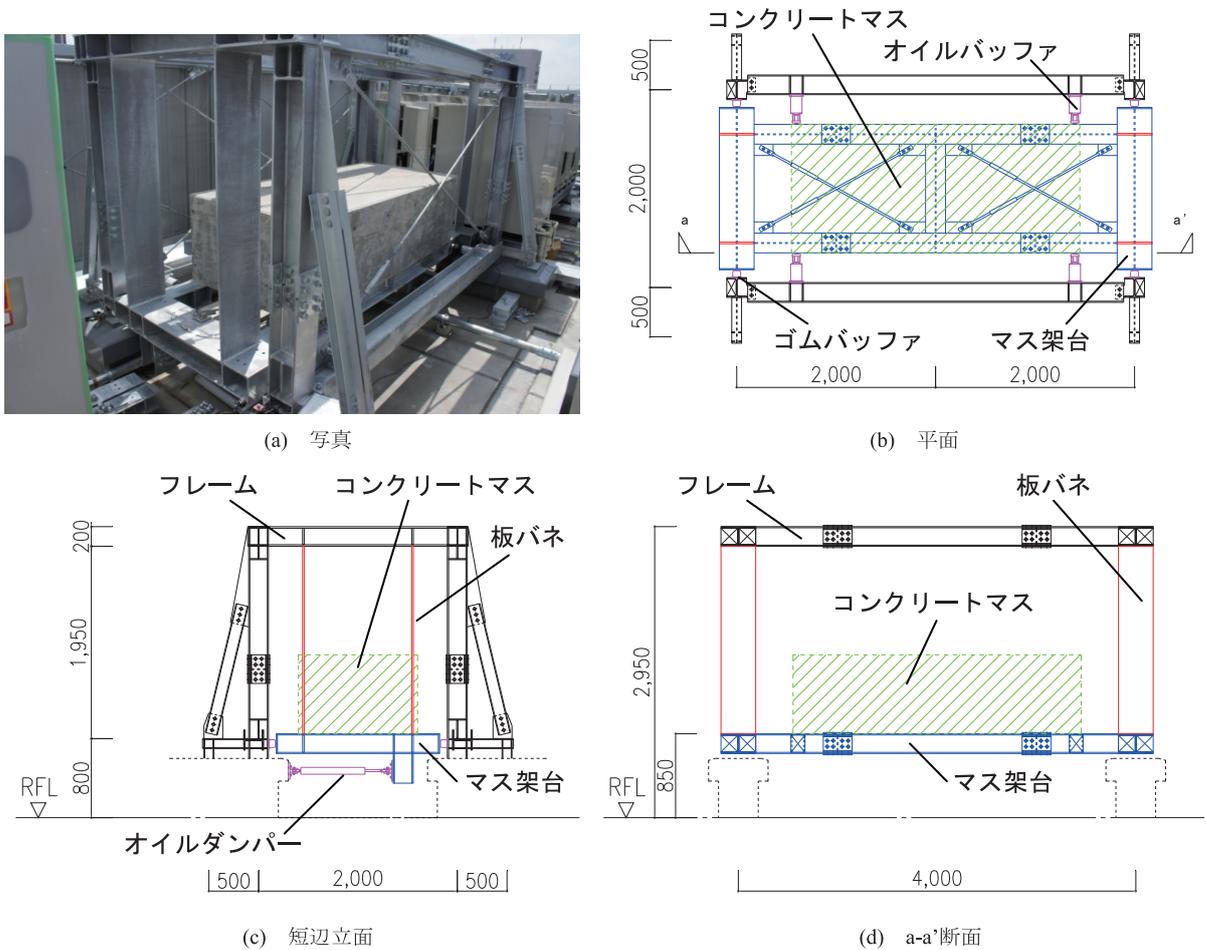


Fig. 3 TMDの概要
Overview of the TMD



(a) 設置パターン1
想定振動数：0.83Hz

(b) 設置パターン2
想定振動数：0.91Hz

(c) 設置パターン3
想定振動数：1.00Hz

Photo 1 剛性調整ブロックを用いた同調機構
Tuning mechanism utilizing steel blocks to adjust the stiffness of the TMD

様な同調方法はコイルバネを別途設置する方法と比べて納まりが良く、ローコストで実現できる。

4 計測概要

計測器の設置位置をFig. 4に示す。計測器はサーボ型加速度計とレーザー変位計を用いた。TMDの設置階であるR階床レベルには、加速度計をX方向に2台、Y方向に2台設置した。マス加速度を計測するため、コンクリートマス上には加速度計を1台設置した。また、TMDのストロークを計測するため、マスの両端位置に変位計を2台設置した。計測のサンプリングは100Hzとした。

TMDの制振効果を確認するため、マスが動く状態（以下、自由状態）での計測だけでなく、マスを固定して動かない状態（以下、固定状態）とした時の計測も行った。マスの固定は、TMDのフレームとマスとの間にジャッキを複数台設置して行った。

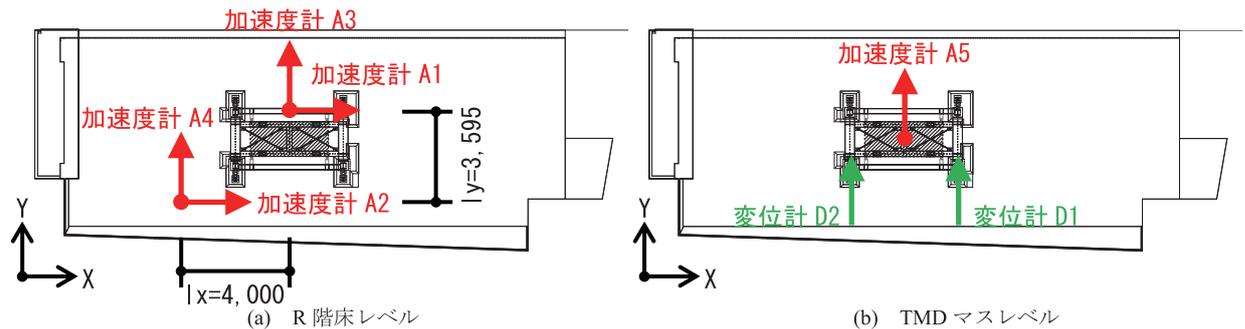


Fig. 4 計測器の設置位置
Location of sensors

5 計測結果

5.1 常時微動計測結果

本TMDの制振効果の確認に先立ち、常時微動時における建物とTMDの振動数を確認した。本計測はTMDのオイルダンパーを取り外した状態で行った。建物の振動数を確認する際はTMDを固定状態とし、TMDの振動数を確認する際は自由状態としてそれぞれ計測した。なお自由状態とした時、常時微動時からTMDが動くことを目視で確認している。

5.1.1 建物の振動数

常時微動計測から得られたR階の加速度のフーリエ振幅スペクトルをFig. 5に示す。建物モードの並進成分と捩れ成分に着目するため、加速度計A1とA2の波形を足し合わせた波形（A1+A2）と差し引いた波形（A1-A2）、加速度計A3とA4の波形を足し合わせた波形（A3+A4）と差し引いた波形（A3-A4）のそれぞれからスペクトルを求めた。

各図からは明確なスペクトルのピークが確認でき、それぞれ建物の振動数に対応すると考えられる。Table 3にスペクトルのピーク位置から求めた建物の振動数を示す。X方向1次モードに対応する振動数は1.17Hz、Y方向1次モー

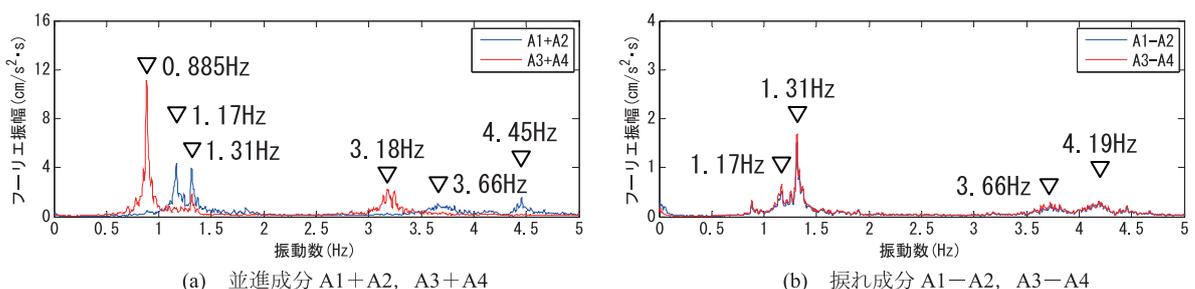


Fig. 5 組合せ波形のフーリエ振幅スペクトル
Fourier amplitude spectrum of combination responses

Table 3 常時微動計測に基づく建物の振動数
Natural frequencies of the building based on microtremor measurements

	X方向		Y方向		揺れ	
	1次	2次	1次	2次	1次	2次
建物の振動数 (Hz)	1.17	3.66	0.885	3.18	1.31	4.19

ドに対応する振動数は0.89Hz, 揺れ1次モードに対応する振動数は1.31Hzと考えられる。

5.1.2 TMDの振動数

常時微動時のTMDはR階の揺れが入力となって揺れている。そこで、剛性調整ブロックの設置パターン毎にR階の加速度（加速度計A3）に対するマス加速度（加速度計A5）のフーリエ振幅比を求めた。結果をFig. 6に示す。

各図からは明確なスペクトルのピークが確認でき、それぞれ剛性調整ブロックの設置パターンに対応したTMDの振動数であると考えられる。スペクトルのピーク位置から求めたTMDの振動数をTable 4に示す。（ ）内の数値はPhoto 1に示したTMDの想定振動数に対する比である。設置パターン2と設置パターン3の振動数は、TMDの想定振動数の9割程度となった。

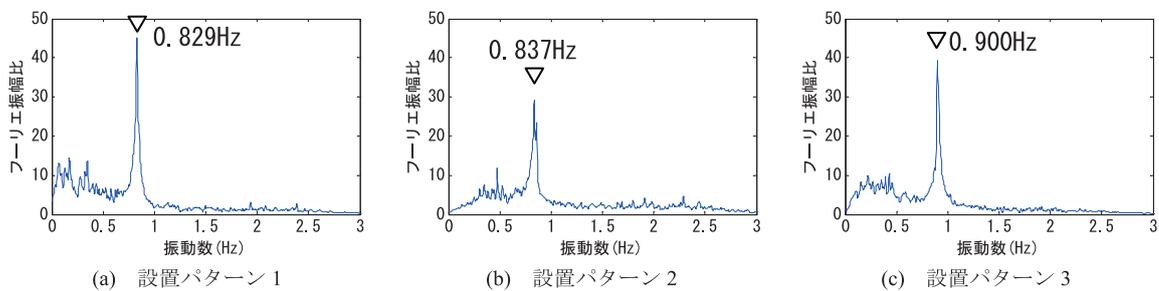


Fig. 6 R階加速度に対するマス加速度のフーリエ振幅比
Fourier amplitude ratio of the mass acceleration for the acceleration at the roof

Table 4 常時微動計測に基づくTMDの振動数
Natural frequencies of the TMD based on microtremor measurements

	設置パターン1	設置パターン2	設置パターン3
TMDの振動数 (Hz)	0.829 (1.00)	0.837 (0.92)	0.900 (0.90)

5.2 マス強制加振実験結果

建物とTMDの特性を確認するため、マス強制加振実験を行った。常時微動計測により確認した剛性調整ブロックの設置パターン毎でのTMDの振動数を加振振動数とし、人力でマスを加振した。本実験はTMDのオイルダンパーを取り外した状態でを行った。

5.2.1 建物の特性

R階の加速度とマス加速度を用い、Y方向の建物の特性を以下の様に同定した。

マス強制加振によりY方向1次モードのみが励起され、その際の地上の揺れが無視できるとすれば、マス強制加振による建物の挙動は式(1)の1質点系運動方程式で表すことができる。ここで、 M , h , ω はそれぞれY方向1次モードの建物の有効質量（R階のTMD設置位置を基準）、減衰定数、固有円振動数である。 m はTMDのマス質量である。また、 \ddot{x} , \dot{x} , x はR階のTMD設置位置における相対加速度、相対速度、相対変位、 \ddot{y} はマスの絶対加速度である。マス強制加振時の建物の線形挙動を仮定し、最小二乗法に基づく式(2)を用いて建物の特性を同定した。 N は同定に用いた計測データのサンプル数である。

地上の揺れを無視できるとしたことから、加速度計A3による加速度（絶対加速度）をR階の相対加速度 \ddot{x} と考え、積分することでR階の相対速度 \dot{x} と相対変位 x を求めた。また、マスの絶対加速度 \ddot{y} は加速度計A5による加速度を用いた。マス重量は剛性調整ブロックの重量を考慮し、設置パターン1で78.5kN, 設置パターン2で79.6kN, 設置パターン3で80.7kNとした。

同定結果をTable 5に示す。設置パターンによらず、結果の値は同程度である。Y方向の有効重量は、Table 1に示した設計時の値と比べてやや小さい。

一例として、設置パターン1と設置パターン3の時のR階の加速度波形の観測結果と、同定結果を用いて解析的に求めた結果をFig. 7に示す。両波形は良く一致している。

$$M\ddot{x}(t) + 2hM\omega\dot{x}(t) + M\omega^2 x(t) = -m\ddot{y}(t) \quad (1)$$

$$\theta = [\phi^T \phi]^{-1} \phi^T \ddot{X} \quad \text{ここで, } \theta = \begin{Bmatrix} 1/M \\ 2h\omega \\ \omega^2 \end{Bmatrix}, \quad \phi = \begin{bmatrix} -m\ddot{y}(1) & -\dot{x}(1) & -x(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -m\ddot{y}(N) & -\dot{x}(N) & -x(N) \end{bmatrix}, \quad \ddot{X} = \begin{Bmatrix} \ddot{x}(1) \\ \vdots \\ \ddot{x}(N) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Table 5 マス強制加振に基づく建物の特性
Building characteristics based on enforced mass excitation tests

	設置パターン1	設置パターン2	設置パターン3
有効重量 (kN)	5,269	5,179	5,198
振動数 (Hz)	0.882	0.883	0.884
減衰定数	0.0098	0.0098	0.0099

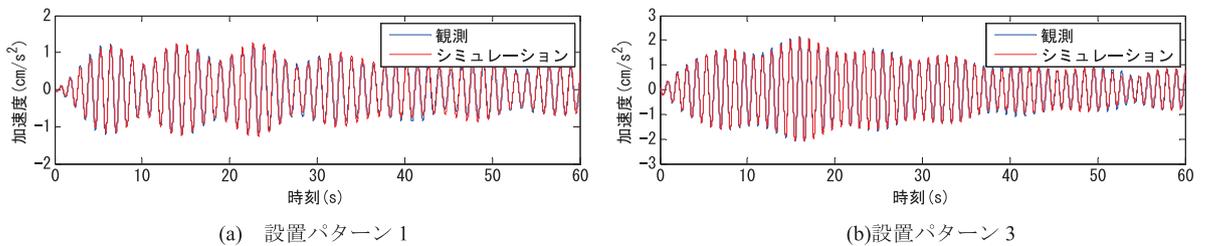


Fig. 7 観測結果とシミュレーション結果の比較
Comparison between observed records and simulation results

5.2.2 TMDの特性

マス強制加振後の自由振動を対象とし、マス加速度（加速度計A5）とストロークから求めたTMDの荷重変形関係をFig. 8に示す。剛性調整ブロックの設置パターンに関わらずTMDの荷重変形関係は線形バネの挙動を示しており、摩擦抵抗の影響はほとんど見られない。マス重量に対する摩擦抵抗の比は0.1/1,000より小さかった。最小二乗法を用いて荷重変形関係の傾きを同定した。この傾きはTMDの剛性Kと考えられる。

Table 6に同定した剛性とマス重量から求めたTMDの振動数を示す。()内の数値はPhoto 1に示したTMDの想定振動数に対する比である。設置パターン2と設置パターン3の振動数は、TMDの想定振動数の9割程度となった。

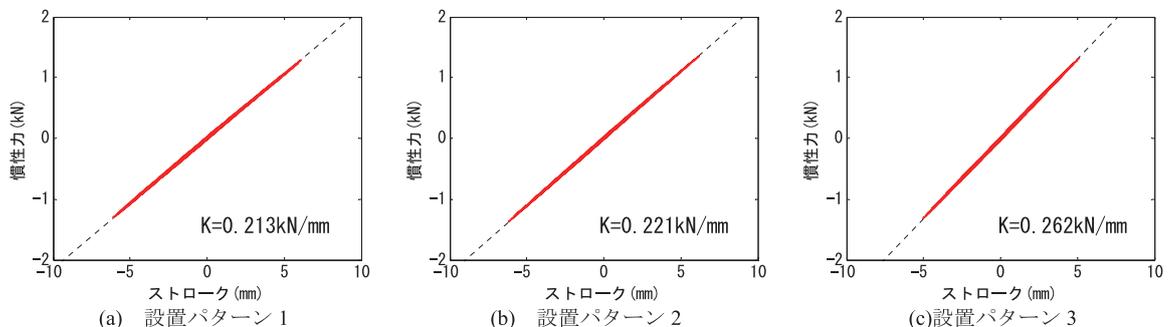


Fig. 8 TMDの荷重変形関係
Hysteresis loops of the TMD

Table 6 マス強制加振に基づくTMDの振動数
Natural frequencies of the TMD based on enforced mass excitation tests

	設置パターン1	設置パターン2	設置パターン3
TMDの振動数 (Hz)	0.822 (0.99)	0.831 (0.92)	0.898 (0.90)

Table 4の結果と比べると各値は良く一致している。

5.3 人力加振実験結果

マス強制加振の結果とオイルダンパーから生じる摩擦抵抗の大きさを考慮し、剛性調整ブロックの設置パターンをパターン1に設定した後、本TMDの制振効果を確認するため人力加振実験を行った。加振方向はX方向、Y方向、捩れとした。人力加振時の人員配置をFig. 9に示す。9階を加振階とし、X方向とY方向加振時は7人で、捩れ加振時は6人で行った。本実験はTMDのオイルダンパーを設置した状態で行った。また、TMDを固定状態とした時と自由状態とした時とでそれぞれ加振を行った。

5.3.1 制振効果

TMDを固定状態とした時の加速度波形をFig. 10に示す。捩れ加振時の加速度は次式による角加速度 θ_1 、 θ_2 で表している。

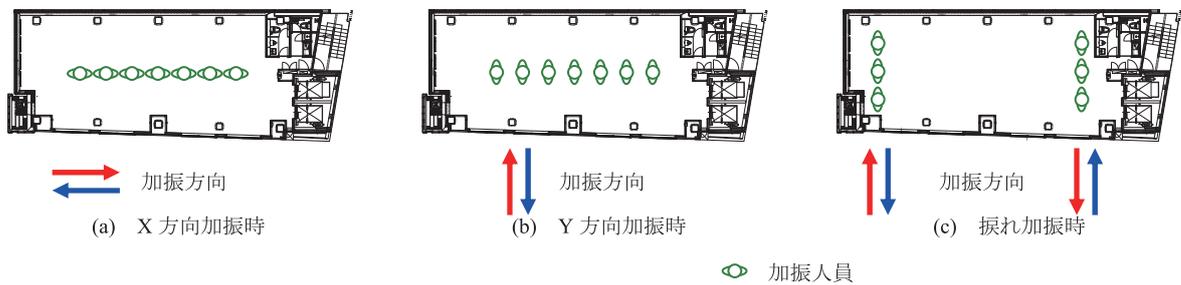


Fig. 9 人力加振時の人員配置
Position of persons for human-powered excitations

$$\theta_1(t) = -(\ddot{x}_1(t) - \ddot{x}_2(t)) / ly \quad (3a)$$

$$\theta_2(t) = (\ddot{x}_3(t) - \ddot{x}_4(t)) / lx \quad (3b)$$

ここで、 \ddot{x}_1 、 \ddot{x}_2 、 \ddot{x}_3 、 \ddot{x}_4 はそれぞれFig. 4に示した加速度計A1、A2、A3、A4から得られた加速度である。 lx 、 ly はFig. 4に示した加速度計間の距離である。

X方向加振時と捩れ加振時の自由振動波形にはややうなりが見られる。2種類の角加速度の波形は良く一致しており、R階床の面内剛性は高いと考えられる。

自由振動波形にうなりが生じた理由として、人力加振の対象モード以外のモードによる影響が考えられる。建物の特性を適切に評価するためには、自由振動波形のうなりを除去する必要がある。そこで、R階の床が剛床であると仮定し、次の様にうなりの除去を行った。

X方向加振時とY方向加振時のうなりは捩れモードによる影響と考えた。捩れモードの回転中心位置 G_0 では捩れモードの加速度成分が生じない。そこで次の様に捩れモードの回転中心位置 G_0 を求めた。

- ①位置G (X_g , Y_g) を任意に仮定する。捩れ加振時において、位置GでのX、Y両方向の自由振動波形のフーリエ振幅を求める。
- ②捩れモード (1.3Hz付近) の振動成分が最も小さくなる位置Gを求め、捩れモードの回転中心位置 G_0 とする。

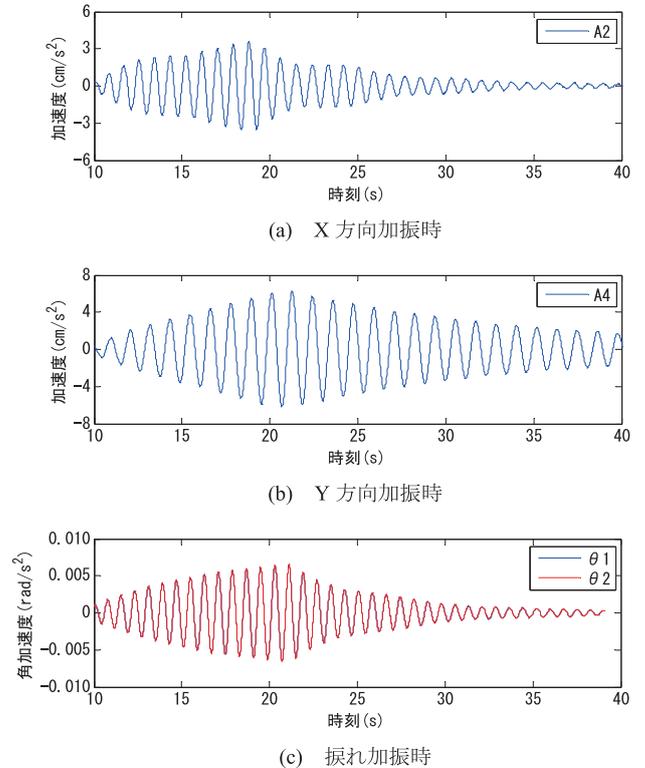


Fig. 10 人力加振時のR階の加速度波形
Accelerations at the roof based on human-powered excitations

また、揺れ加振時のうなりはX方向モードによる影響と考えた。X方向モードの回転中心位置 G_x ではX方向モードの加速度成分が生じない。そこで次の様にX方向モードの回転中心位置 G_x を求めた。

- ①位置 $G (X_g, Y_g)$ を任意に仮定する。X方向加振時において、位置 G でのX、Y両方向の自由振動波形のフーリエ振幅を求める。
- ②X方向モード（1.2Hz付近）の振動成分が最も小さくなる位置 G を求め、X方向モードの回転中心位置 G_x とする。

Fig. 11に回転中心位置を示す。固定状態、自由状態共に回転中心位置の違いはなかった。

TMDを固定状態とした時の回転中心位置での加速度波形をFig. 12に示す。Fig. 10と比べ、自由振動波形のうなりが除去されている。

TMDを自由状態とした時の回転中心位置での加速度波形をFig. 13に示す。Fig. 12と同様、自由振動波形のうなりは生じていない。またY方向加振では、TMDを固定状態とした時と比べ加振後の自由振動波形が早く減衰している。

Fig. 12, Fig. 13に示した自由振動波形を用い、建物の特性を評価した。先ずFig. 14に示す様に、加振後の自由振動波形から振幅のピーク値を取り出した。建物の振動数はピーク位置 i から $i+3$ までの3波分の波形間隔 T_i を基に、平均振動数 f_i Hz ($=3/T_i$)として評価した。また建物の減衰定数は、ピーク位置 i の正負振幅の大きさ P_i, Q_i から全振幅 $P_i + Q_i$ を計算し、3波先の全振幅 $P_{i+3} + Q_{i+3}$ との比 d_i を用いて次式⁵⁾から評価した。

$$h_i = \ln d_i / 2\pi / 3 \quad \text{ここで、} \quad d_i = (P_i + Q_i) / (P_{i+3} + Q_{i+3}) \quad (4)$$

X方向の評価では、X方向加振時の回転中心位置 G_0 でのX方向の自由振動波形を用いた。Y方向の評価では、Y方向加振時の回転中心位置 G_0 でのY方向の自由振動波形を用いた。

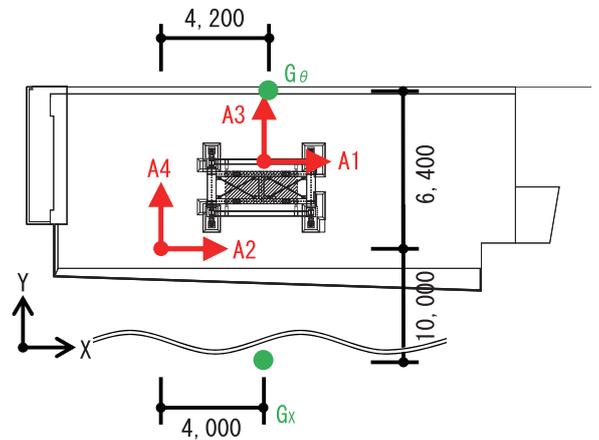
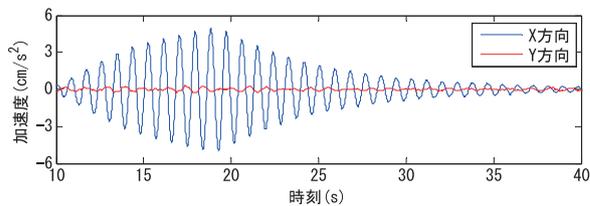
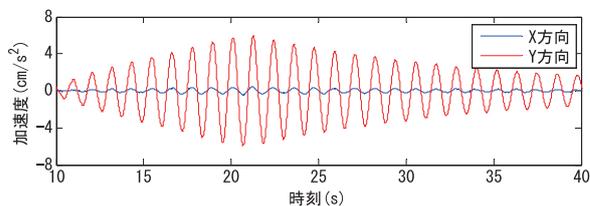


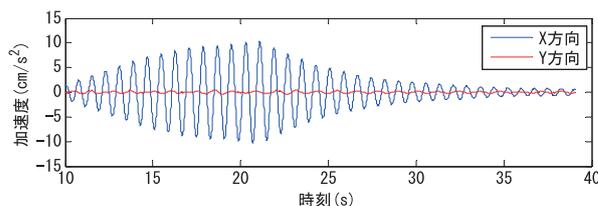
Fig. 11 回転中心位置
Center positions of rotation



(a) X方向加振時

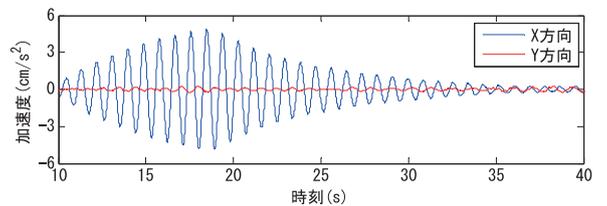


(b) Y方向加振時

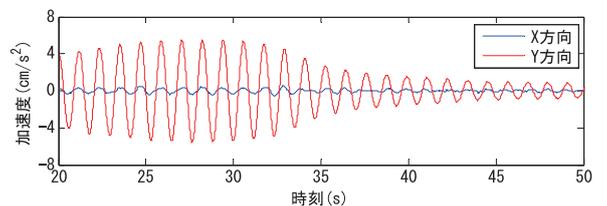


(c) 揺れ加振時

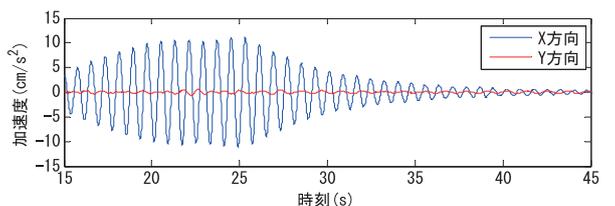
Fig. 12 固定状態とした時の回転中心位置での加速度波形
Accelerations at the center position of rotation
when the mass of the TMD was fixed



(a) X方向加振時



(b) Y方向加振時



(c) 揺れ加振時

Fig. 13 自由状態とした時の回転中心位置での加速度波形
Accelerations at the center position of rotation
when the mass of the TMD was free

振れの評価では、振幅を振れモードによる角加速度で表すため、振れ加振時の回転中心位置 G_x でのX方向加速度を回転中心位置 G_0-G_x 間の距離(16,400mm)で除算し、角加速度で表した自由振動波形を用いた。

加速度振幅と振動数の関係をFig. 15に示す。加速度振幅は正負振幅の大きさ P_i, Q_i の平均値を用いている。各方向の振動数は加速度振幅による変化が小さい。TMDを固定状態とした時と自由状態とした時との違いも小さい。

加速度振幅と減衰定数との関係をFig. 16に示す。X方向と振れの減衰定数は加速度振幅が大きな領域で安定した値を示しており、TMDを固定状態とした時と自由状態とした時との違いは小さい。固定状態とした時のY方向の減衰定数は、加速度振幅が大きな領域で安定した値を示している。これに対して自由状態とした時のY方向の減衰定数は、加速度振幅が大きくなる程大きな値を示している。減衰定数の増加は本TMDの制振効果によるものと考えられる。

建物の特性の評価結果をTable 7に示す。Fig. 15, Fig. 16において加速度振幅が大きな方のプロットから4点の値の範囲を示している。なお、()の振動数の値は、Table 3に示した常時微動計測に基づく振動数の値である。

X方向と振れに関しては、TMDを固定状態とした時と自由状態とした時とで各値の違いは小さい。減衰定数は2.5%程度と大きな値を示している。Y方向に関しては、固定状態とした時に1.3%程度であった減衰定数が、自由状態とした時に3.7%程度まで増加している。減衰定数の増加は本TMDの制振効果によるものと考えられる。

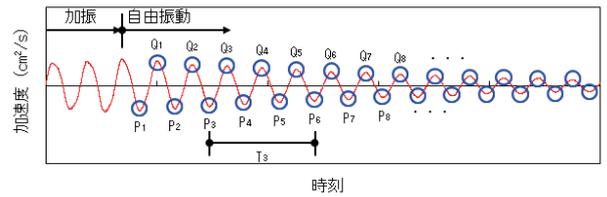
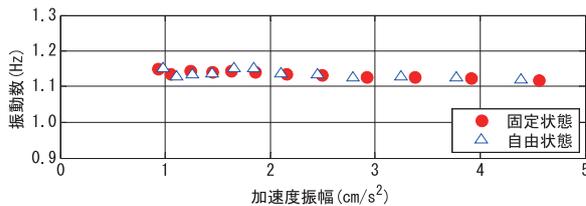
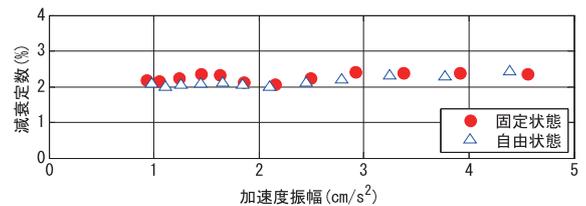


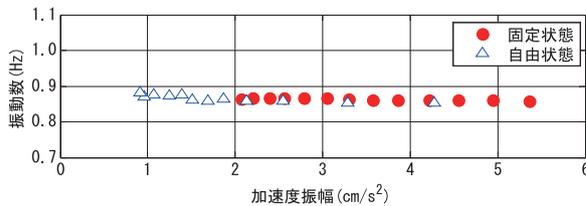
Fig. 14 自由振動波形のピーク位置
Peak points of free vibration responses



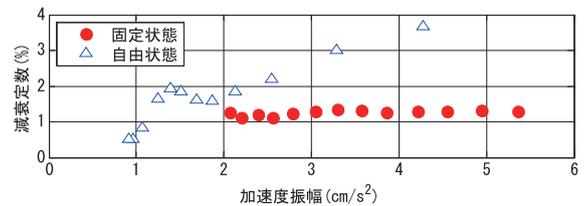
(a) X方向加振時



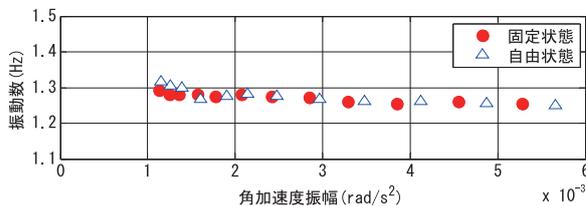
(a) X方向加振時



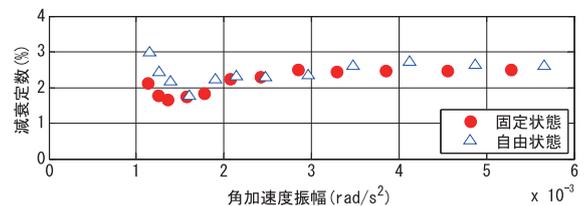
(b) Y方向加振時



(b) Y方向加振時



(c) 振れ加振時



(c) 振れ加振時

Fig. 15 加速度振幅と振動数の関係
Relationship between acceleration amplitudes and natural frequencies

Fig. 16 加速度振幅と減衰定数の関係
Relationship between acceleration amplitudes and damping ratios

Table 7 人力加振に基づく建物特性の評価結果
Estimated building characteristics based on human-powered excitations

	X方向		Y方向		振れ	
	固定状態	自由状態	固定状態	自由状態	固定状態	自由状態
振動数 (Hz)	1.12~1.13 (1.17)	1.12~1.13	0.86~0.86 (0.89)	0.85~0.86	1.26~1.26 (1.31)	1.25~1.26
減衰定数	0.024~0.024	0.022~0.024	0.013~0.013	0.018~0.037	0.025~0.025	0.026~0.027

5.3.2 TMDの挙動

TMDを自由状態とした時のY方向加振時のR階の加速度（加速度計A3）とマス加速度（加速度計A5）をFig. 17に示す。TMDが建物に同調しているため、R階の加速度よりもマス加速度は大きい。しかし、R階の加速度が 1cm/s^2 より小さくなると両波形は一致しており、この時TMDの動きは止まっていると考えられる。本支持機構から生じる摩擦抵抗は非常に小さく、マス重量に対する摩擦抵抗の比は $0.1/1,000$ より小さいため、オイルダンパーから生じる摩擦抵抗によりTMDの動きが止まったと考えられる。 1cm/s^2 のマス加速度に対してTMDが動かないと考えれば、マス重量が 78.5kN であることから2本のオイルダンパーから生じる摩擦抵抗の大きさは 78.5N 程度（マス重量に対する摩擦抵抗の比は $1/1,000$ 程度）と考えられる。

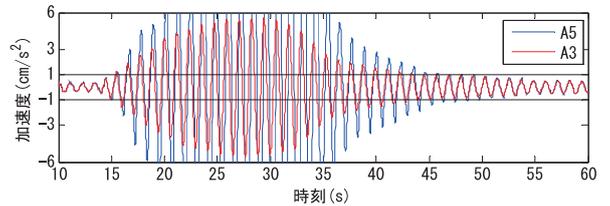


Fig. 17 R階の加速度とマス加速度の比較
Comparison between the acceleration at the roof and the mass acceleration

マス加速度とストロークから求めたTMDの荷重変形関係をFig. 18に示す。図中の直線は、Fig. 8 (a) に示したTMDの剛性 ($K=0.213\text{kN/mm}$) に基づく傾きを示している。TMDは小さなストロークから履歴を描いているが、純粋な粘性系の履歴とは言えない。その違いはオイルダンパーから生じる摩擦抵抗の影響と考えられる。

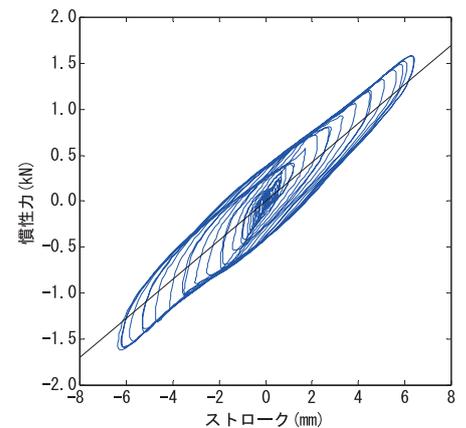


Fig. 18 TMDの荷重変形関係
Hysteresis loops of the TMD

TMDの荷重変形関係において1ループ毎に求めた等価周期、等価減衰係数をFig. 19に示す。横軸のストローク振幅の値は1ループの正負最大ストロークの大きさの平均値を示している。また、図中の点線はTable 6で示したTMDの振動数と、オイルダンパーの減衰係数の設計値を示しており、ストローク振幅が大きくなると実験値は各値に近づく。概ねストローク振幅が 5mm 以上になると摩擦抵抗の影響は小さく、本TMDの挙動は理想的な挙動に近づくと考えられる。

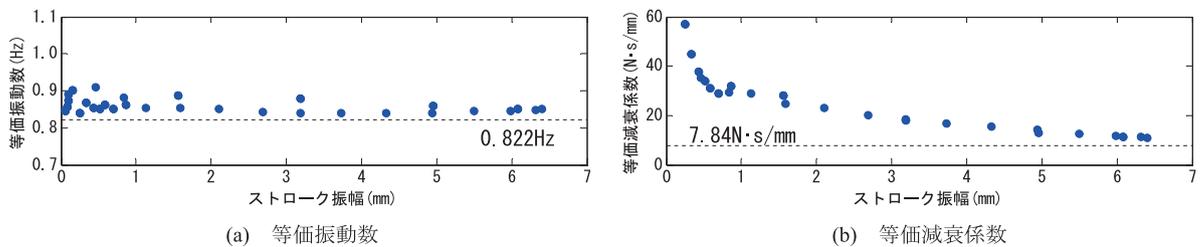


Fig. 19 1ループ毎に評価した等価振動数と等価減衰係数
Equivalent frequencies and equivalent damping coefficients estimated from results based on each loop

6 居住性能の再評価

実験結果に基づき建物の居住性能を再評価した。風外力の条件と評価位置に関しては、2章で示した設計時の条件と同じである。振動数と減衰定数の値は、Fig. 15, Fig. 16においてR階での最大加速度の評価値に対応した加速度振幅における値を採用した。

Fig. 20に居住性能の再評価結果を示す。揺れの最大加速度は 1cm/s^2 よりも小さく、そのプロットは図の欄外に位置している。Y方向において、TMDが設置された時の最大加速度はクライテリアとしたH-70のラインを下回っている。

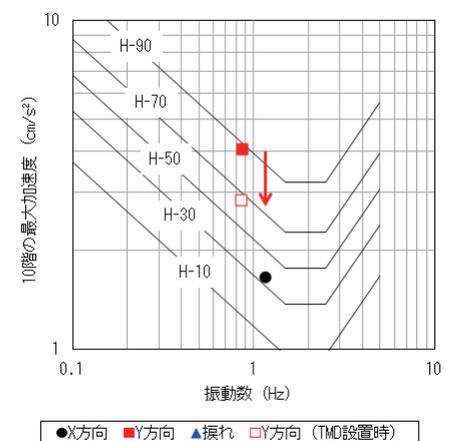


Fig. 20 実験結果に基づく居住性能の再評価結果
Re-estimated results of habitability at 10th floor based on experimental results

7 まとめ

建物高さ約34mの鉄骨系高層建物において、居住性を確保するため板バネを利用した振り子式TMDを設置した。本TMDの概要とその制振効果に関する実験結果を報告した。

オイルダンパーを取り外した状態でマス強制加振実験を行った。板バネを利用した振り子式支持機構から生じる摩擦抵抗は非常に小さく、荷重変形関係からはTMDが理想的な線形バネ特性を示すことが確認できた。1~2cm/s²程度の揺れからTMDに制振効果を発揮させるためには、本TMDが採用した板バネを利用した振り子式支持機構の有用性は非常に高いと考えられる。

オイルダンパーを設置し、TMDを固定状態とした時と自由状態とした時とでそれぞれ人力加振実験を行った。TMDが制振効果を発揮する建物の短辺方向（Y方向）において、固定状態とした時1.3%程度であった減衰定数が、自由状態とした時最大3.7%程度まで増加することを確認した。

TMDの減衰機構として用いた2本のオイルダンパーからは合計80N程度の摩擦抵抗（マス重量に対する摩擦抵抗の比は1/1,000程度）が生じるため、R階の加速度が1cm/s²を下回るとTMDが停止した。一般的に80N程度の摩擦抵抗は小さいと言えるが、1~2cm/s²程度の揺れからTMDに制振効果を発揮させるためにはその影響を無視することができない。本TMDの様にマス重量が小さな場合は特に注意を必要とする。

参考文献

- 1) 木村秀樹, 莊大作, 岩下敬三, 春日康博, 上林厚志, 大野友則, 鈴木直幹, 金子洋文, 山本雅史:「建物の浮き上がり許容による制震構造の開発(その1)~(その6)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.549-560, 2001年9月
- 2) 「建築物の荷重指針・同解説(2004)」, 日本建築学会, 2004年
- 3) 「建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説」, 日本建築学会, 2004年
- 4) 「建築物の減衰」, 日本建築学会, 2000年
- 5) 柴田明德:「最新 耐震構造解析」, 森北出版, 1981年