

大地震対応の倒立振り子併用型TMD「ペアマスダンパー™」

吉田 治 西影 武知 佐野 剛志
(大阪本店構造設計部)

渡邊 真吾 藤田 政也 下田 亮太
(設計本部構造設計部) (設計本部構造設計部) (大阪本店構造設計部)

Tuned Mass Damper with Inverted Pendulum for Reducing Seismic Response

Osamu Yoshida Taketomo Nishikage Takeshi Sano
Shingo Watanabe Masaya Fujita Ryota Shimoda

Abstract

To reduce the seismic response of super high-rise buildings owing to long-period seismic motion, such as during the expected Nankai Trough earthquake, a tuned mass damper (TMD) in combination with a pendulum and an inverted pendulum has been developed. This TMD can be made remarkably smaller and its natural period can be tuned more easily compared to the conventional pendulum-type TMD. In addition, a fail-safe mechanism has been developed to prevent the huge mass of TMD from being overloaded and damaged against greater seismic motion than that of the design level. Using prototype scaled TMD model, two-dimensional shaking table tests were conducted, and the dynamic characteristic of the TMD model and performance of fail-safe were verified. Furthermore, finite element analysis considering geometric nonlinearity showed good agreement with the experimental results.

概要

南海トラフ地震などで発生が予測されている長周期地震動に対する超高層建物の安全性の確保が重要な課題となっており、その対策として建物頂部に大質量TMD (Tuned Mass Damper) を設置する制振構造が採用され始めている。大地震対応型TMDの様々な課題を解決するため、振り子と倒立振り子を併用した大地震対応型TMDを開発した。このTMDでは、従来の振り子型TMDと比較して、装置のコンパクト化が可能、容易に周期調整が可能である。また、想定を上回る巨大地震時に振り子の過大変形による損傷等を抑制するフェールセーフ機構も開発した。開発した技術の縮小模型試験体を用いて振動台実験を行った結果、TMDは理論通りの固有周期と減衰の特性を有し水平2方向にスムーズに動作すること、フェールセーフ機構がTMD振り子の過大な変位を抑制することを確認した。また、幾何学的非線形性を考慮した有限要素解析で実験結果を精度よく再現でき、実機の設計に活用できることも確認した。

1. はじめに

一般的に、超高層建物は大地震に対して耐震性に優れているとされてきたが、2011年の東北地方太平洋沖地震の際に遠く離れた東京や大阪において、長周期地震動により大きな揺れを生じた。今後発生が予測されている南海トラフ地震などで生じる長周期地震動に対する超高層建物の安全性の確保が重要な課題となっている。

これに対し、近年、長周期地震動対策など大地震にまで効果を期待する大質量TMD (Tuned Mass Damper) を用いた制振構造が実際の超高層建物に採用され始めている^{1), 2), 3)}。

本報では、コンパクト化および周期調整の容易さを目的とした、振り子と倒立振り子を併用した大型TMDの開発について報告する。2章では、倒立振り子併用型TMDの概要と振動特性について、3章では、想定外の入力に対するTMDに付与するフェールセーフ (以降、FSと称す) 機構

について、4章では、縮小試験体による振動台実験の結果を、5章では、解析シミュレーションについて示す。

2. 倒立振り子併用型TMDの振動特性

TMDはFig. 1に示すように建物本体の頂部に副振動系を付加することで振動を制御する制振機構である。大質量TMDは建物1次有効質量比 $\mu=5\sim 10\%$ (建物質量の2~4%)程度以上の大きな質量と適切な減衰を与えることで、以下に示すような多くの長所が考えられる。

- ① 建物頂部の装置のみで大きな制振効果を発揮するため層間のダンパーを不要または大幅に削減できる
- ② 内部補強を少なくできるため、新築だけでなく既存超高層建物の耐震補強にも適用しやすい
- ③ 繰り返しの多い長周期地震動に対しては、特に大きな応答低減効果を発揮する

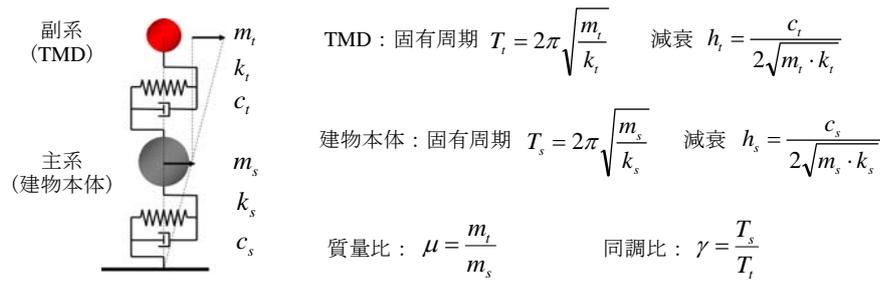


Fig. 1 TMDを有する構造物の振動モデルとパラメータ
Model of Structure with TMD and Parameters

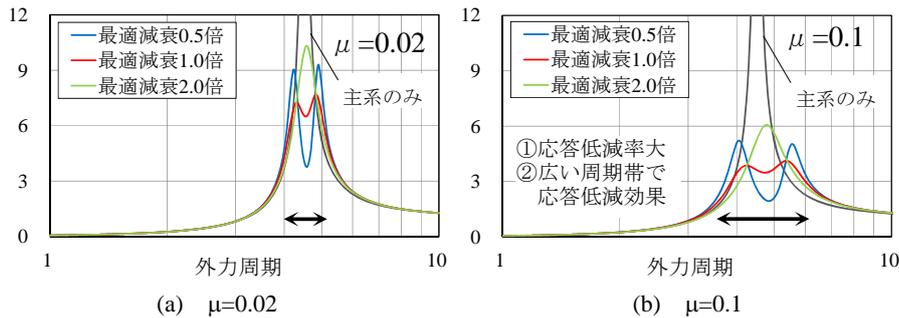


Fig. 2 TMDを有する構造物の応答倍率
(主系 $T_s=4.5s$, $h_s=0.02$ の例)
Transfer Functions of Structure with TMD

- ④ 質量比を大きくとることにより、有効な周期帯が広くなり (Fig. 2)、非線形性により建物の周期が多少変動する大地震まで制振効果を発揮できるとともに、長周期地震動以外のさまざまなタイプの地震動に対しても制振効果を発揮できる^{1),2),3)}
- ⑤ 高層階の応答低減に効果的である
一方で、大地震時に大質量の錘を大振幅で動かす必要があるため、以下に示すような解決すべき課題も多い。
- ① 錘の支持方法と変形性能確保
 - ② ダンパーのストローク確保
 - ③ 設置後の周期調整の容易さ
 - ④ 想定を超える地震動に対する冗長性の確保
 - ⑤ 屋上に設置するためのコンパクト化
- そこで、これらの課題を解決できる技術として、倒立振り併用型TMDを開発した。

2.1 倒立振り併用型TMDの運動方程式と固有周期
本報で扱う倒立振り併用型TMDの振動モデルをFig. 3(a)に示す。倒立振子の例として、振り錘 m_1 と倒立錘 m_2 同士を鉛直ばねや鉛直ダンパーで接続した機構⁴⁾が提案されているが、本報で提案する機構では、ダンパー c_d は倒立ロッドを介して設置され、以下の特徴がある。

- ① 建物に対して水平に接続している
- ② 倒立錘より低い位置で倒立ロッドに取り付ける

①によりTMDの減衰が線形に付与されるため小振幅から大振幅まで安定した性能となる。②によりダンパー

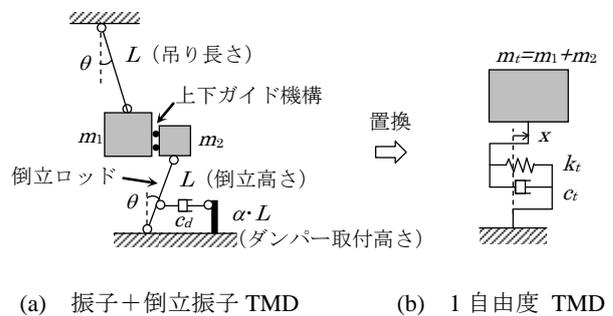


Fig. 3 倒立振り併用型TMDモデル
Model of TMD with Inverted Pendulum

の必要ストロークが短くなり既製品のオイルダンパーで対応が可能となる。ここで、吊り長さ L と倒立高さ L とした。
このモデルの振り角度 θ に関する自由振動の運動方程式は式(1)となる。

$$(m_1 + m_2)L\ddot{\theta} + c_d \alpha^2 L \cos^2 \theta \cdot \dot{\theta} + (m_1 - m_2)g \sin \theta = 0 \quad (1)$$

ここで、倒立高さ L に対するダンパー取付高さを αL 、重力加速度を g とする。また、倒立振子の質量が振り質量より大きい場合は不安定となるため、 $m_1 > m_2$ とする。
式(1)は $\sin \theta$ および $\cos \theta$ の項を含むため幾何学的非線形特性を有しており複雑となる。簡略化するために微小振幅 ($\theta \leq 30^\circ$) を仮定して $\sin \theta \cong \theta$, $\cos \theta \cong 1$ と近似す

ると、運動方程式は線形化され式(2)となり、その固有周期は式(3)となる。

$$(m_1 + m_2)L\ddot{\theta} + c_d\alpha^2 L\dot{\theta} + (m_1 - m_2)g\theta = 0 \quad (2)$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 - m_2} \cdot \frac{L}{g}} \quad (3)$$

式(3)より倒立振子を併用した場合の固有周期は、吊り長さが同じ単振り子 ($T = 2\pi\sqrt{L/g}$) と比較して

$\sqrt{(m_1 + m_2)/(m_1 - m_2)}$ 倍となる。単振り子と同じ固有周期を得るための吊り長さを短くできるため、コンパクト化を図る上で有効となる。

また、単振り子の場合は固有周期が吊り長さのみに依存するため周期調整が難しいが、倒立振子を併用した場合は吊り長さを変えずに、 m_1 と m_2 の配分により周期調整が容易に可能となる。

2.2 倒立振子併用型TMDの最適条件

式(2)の線形化された倒立振子併用型TMDの運動方程式に対し、式(4)~式(7)の置換を行う。

$$m_t = m_1 + m_2 \quad (4)$$

$$c_t = c_d\alpha^2 \quad (5)$$

$$k_t = (m_1 - m_2)g/L \quad (6)$$

$$x = L\theta \quad (7)$$

倒立振子併用型TMDの運動方程式は式(8)となり、Fig.3(b)に示す1自由度系モデルとして扱うことができる。

$$m_t\ddot{x} + c_t\dot{x} + k_t x = 0 \quad (8)$$

これより、TMDと建物の全体モデルは、倒立振子併用型TMDを1自由度の付加振動系とし、建物本体を1自由度の主振動系とした2自由度系モデルとして扱うことが可能となり、最適同調 T_{opt} ・最適減衰 h_{opt} の条件は、通常のTMDに用いられているDen Hartogらの方法⁵⁾が適用可能となる。

$$\text{最適同調} : T_{opt} = (1 + \mu) \cdot T_s \quad (9)$$

$$\text{最適減衰} : h_{opt} = \sqrt{3\mu/8(1 + \mu)} \quad (10)$$

2.3 地震応答解析による制振効果とモデルの検証

TMDの制振効果を地震応答解析により検証する。式(1)によるTMD運動方程式をFig. 4(a)に示すモデルに適用して厳密に解く場合と、Fig. 4(b)に示すように式(8)によりTMDを1自由度系に置換し、全体2自由度系近似モデルとする場合を比較する。

解析諸元は、主系質量 $m_s = 5000t$ 、周期 $T_s = 4.5s$ 、減衰 $h_s = 0.02$ 、質量比 $\mu = m_t/m_s = 0.1$ 、TMD質量

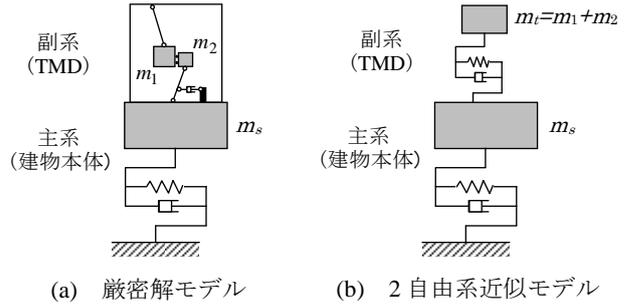


Fig. 4 倒立併用型 TMD モデルの置換
Model Transformation of TMD with Inverted Pendulum

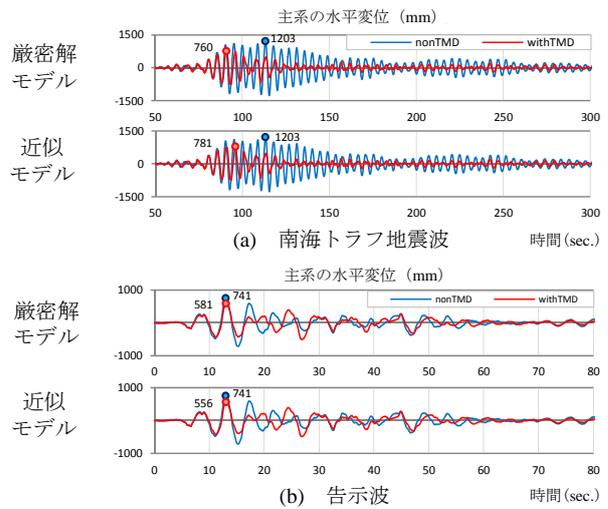


Fig. 5 厳密解と2自由度系近似解の比較
Comparison between Exact and Approximate Solutions

$m_t = 500t$ (内 $m_1 = 414t$, $m_2 = 86t$)、振り子・倒立振り子長さ $L = 4.0m$ 、 $\alpha = 0.3$ とした。TMD周期および減衰はDen Hartogらの最適条件式から、 $T_t = 4.95s$ 、 $h_t = 0.185$ とした。入力地震動は、南海トラフ地震の大阪平野での予測地震波(以下、南海トラフ地震波と称す)と告示波とした。TMDのある場合とない場合も合わせて比較する。検討結果をFig. 5に示す。Fig. 5から、以下のことが言える。

- ① TMDによる応答低減効果は、長周期地震動である南海トラフ地震波の方が顕著であるが、告示波に対しても有効である。
- ② 厳密解モデルと2自由度系近似モデルでの差は十分小さく、線形近似可能な振り子角度 30° 程度までなら、建物全体の設計でもTMDは線形1自由度系へのモデル化が実用上可能である。

3. フェールセーフ架台を用いた過大地震動対策

1章にて述べたように、大地震動対応TMDの実現には、建物の固有周期の変動に対して制振性能が影響を受けにくい性状(ロバスト性)の確保や、TMD装置の最大変形を $\pm 2m$ 程度(振り子や積層ゴム等で構成する復元バネやダ

ンパー等の製作性や性能検証が可能な範囲)に留めなければならぬことなどから、建物質量の2~4%程度の巨大な付加質量が必要となる。

巨大な付加質量を有するTMDを搭載した建物が、設計で想定した地震動を上回る過大地震動に遭遇すると、TMDの損傷に伴う応答の増大や、付加質量の脱落など重大事故に繋がる可能性がある。このため大地震動対応TMDには過大地震動対策としてFS機構が必要不可欠である。FS機構としてTMD装置が限界変形を超えそうになると、付加質量を急制動する方法²⁾などが提案されているが、急制動後はTMDの性能低下により、建物応答の増大に繋がる可能性もある。

本報では、TMDを建物に直接固定搭載するのではなく、FS架台を介してTMDを建物に搭載することで、過大地震動時にTMDの損傷を防ぎ、制振性能の低下を抑制する方法を提案し、その効果について検討した。

3.1 FS架台の概要

3.1.1 FS架台の構成 FS架台は、上部に搭載するTMDの鉛直荷重を建物に伝達する役割と、TMDと建物間の水平方向制御力を伝達する役割を担う。Fig. 6に水平方向に関するTMDとFS架台の作動概念図を示す。FS架台は、復元バネとFSダンパーで構成し、両部材の水平力の和がTMDの最大制御力を上回らないように設計することでFS機能を発揮する。

3.1.2 FS架台の作動と効果 設計地震動の範囲内(TMDが装置の機構やダンパー等で決まる限界変形を下回る範囲内)ではFSダンパーが概ね固定状態を保つことでFS架台はほとんど変形せず、TMDのみが作動する。

設計地震動を上回る過大地震動に建物が遭遇し、TMDの制御力が最大制御力に近づくと、FSダンパーの減衰係数が低下する領域(リリース域)に達して作動を開始し、FS架台がTMDの制御力を建物に伝達しながら変形する。

このFS架台の作動により、建物からTMDに作用する力(TMDから建物に作用する制御力)が制限されるため、TMDの過大応答による衝突や損傷、建物応答(応答加速度や層せん断力)の急増が防止できる。

また、FS架台が作動中はFSダンパーがエネルギー吸収するため、急激な制振性能の低下も生じない。

3.2 地震応答解析によるFS架台の効果検討

提案するFS架台の作動状況やTMDの制振効果を地震応答解析によって確認した。

3.2.1 解析モデル 解析モデルをFig. 7に示す。制振対象建物は、固有周期4.5秒で1次有効質量5000tの1質点モデル(減衰定数2%)とした。この建物にTMDのみを搭載する場合と、FS架台にTMDを搭載する場合で応答性状を比較した。

TMDの付加質量は制振対象建物の1次有効質量の10%(質量比0.1)に相当する500tとした。TMDの限界変形は±2mと想定した。TMDの諸元をTable 1の上段に示す。

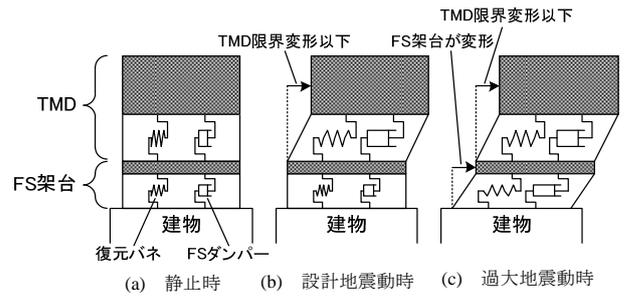


Fig.6 FS架台の概念図

Basic Idea of Fail-Safe Platform

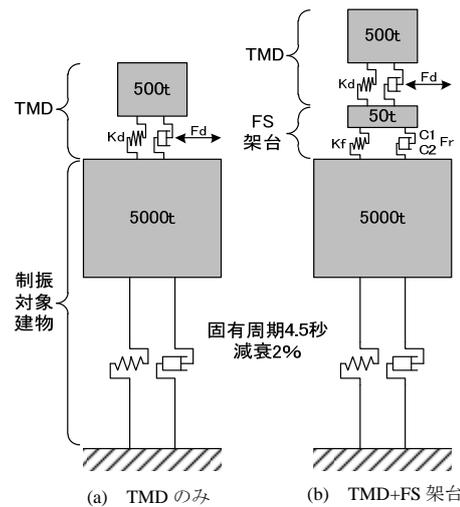


Fig.7 地震応答解析モデル

Analysis Model

Table 1 TMDとFS架台の諸元
Specification of TMD and FS Platform

TMD	同調周期	4.95秒
	バネ定数	$K_d = 8.06 \text{ kN/cm}$
	最大制御力	$F_{dmax} = 1612 \text{ kN} (= K_d \times 200 \text{ cm})$
FS架台	復元バネ	$K_f = 3.12 \text{ kN/cm}$
	FSダンパー	$C_1 = 260 \text{ kN/(cm/sec.)}$
		$C_2 = 3.4 \text{ kN/(cm/sec.)}$
		$F_r = 1300 \text{ kN}$

TMDを搭載するFS架台の質量は50tと仮定した。FSダンパーの初期粘性減衰係数 C_1 は、設計地震動の範囲内でFS架台が概ね固定状態を保てるように実現可能で極力大きな値とした。FSダンパーの減衰係数が切替わる荷重(リリース荷重) F_r は、FS架台の変形に伴い復元バネの伝達力が上昇することを考慮し、TMD最大制御力の約80%に相当する1300kNとした。FSダンパーのリリース後の粘性減衰係数 C_2 は、TMDに過大な地震力が伝達しないように極力小さい値とした。FS架台の諸元をTable 1の下段に示す。

入力地震波は、告示波(極稀、ランダム位相)を原波とし、最大振幅を変えて応答解析を実施した。

Table 2 最大応答値
(原波, 原波×1.5倍, 原波×2倍入力時)

入力加速度 cm/s ²	TMD			TMD+FS 架台					
	建物 加速度 cm/s ²	建物 変位 cm	TMD 変形 cm	建物 加速度 cm/s ²	建物 変位 cm	TMD 変形 cm	FS 変形 cm	FS + TMD 変形 cm	FS 残留 変形 cm
原波 417.2	85.1	47.1	109.6	85.3	47.4	105.1	2.8	105.9	0.4
原波×1.5 625.8	127.6	70.7	164.4	127.9	71.1	154.6	6.6	159.0	0.7
原波×2 834.5	170.1	94.3	219.2	174.6	94.8	181.1	46.6	224.7	0.8

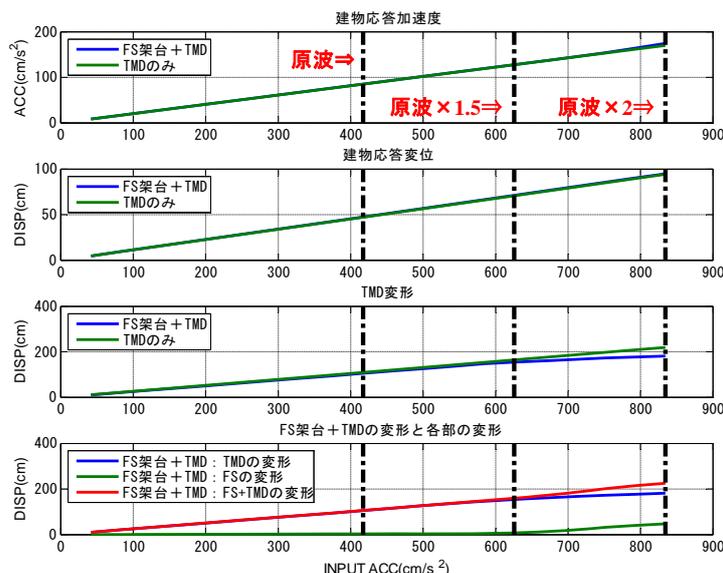


Fig. 8 入力加速度と最大応答値の関係

Relation between Input Ground Acceleration and Maximum Response

3.2.2 解析結果 Table 2に原波, 原波×1.5倍, 原波×2倍入力時の最大応答値, Fig. 8に入力加速度と最大応答値の関係を示す。

Table 2によると, TMDの変形は, 原波×2倍入力時にTMDのみの場合, 限界変形を超え219cmに達しTMDが損傷する可能性の有るレベルとなる。一方, FS架台+TMDでは, 入力が原波×1.5倍を超えると, TMDストロークが最大ストロークの80%である160cmに達してFSダンパーがリリースし, FS架台が作動し始める。原波×2倍入力時には, FS架台が47cmまで変形することでTMDの変位を限界変形以内の181cmに低減できている。

建物加速度, 建物変位の最大応答値は, 原波×1.5倍入力時まではTMDのみの場合とFS架台+TMDの場合の間に大きな差は生じない。これはFS架台の変形が3cm~7cm程度でTMD本体の変形と比較し十分小さくTMDの効果に影響しないためと考えることができる。原波×2倍入力時には, FS架台が作動しているため, TMDのストロークが抑制されてTMD本体のエネルギー吸収量は低下するが, FSダンパーがエネルギー吸収を開始するため, T

MDのみと比較し制振効果の減少(建物加速度や建物変位の増大)がほとんど生じない。

Fig. 7に示す本解析モデルのようにFSダンパーに粘性系のデバイスを利用するとFS架台の残留変位もほとんど生じないことがわかる。

Fig. 8によると, 原波×1.5倍入力を超えてから, FS架台の変形が入力加速度の増加に応じて緩やかに増加することがわかる。

4. 縮小試験体を用いた振動台実験

2章の検討で, TMDを厳密解で解析した場合と線形1自由度系でモデル化した場合の差は小さく, 建物全体の設計においては, TMDを線形1自由度系でモデル化することが実用上可能であることがわかった。しかしながら, TMDの装置の詳細設計を行うにあたり, 考案した機構で振子と倒立振子が想定通りに連動して動き, 理論通りの固有周期となることを確認しておく必要がある。また, 実際の装置は水平2方向に動く2次元構造となるため, 直

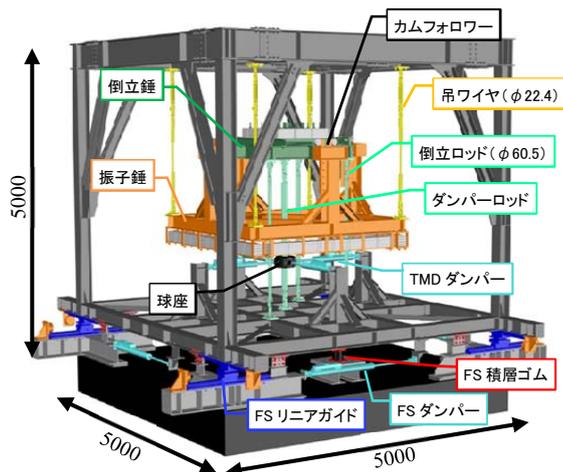
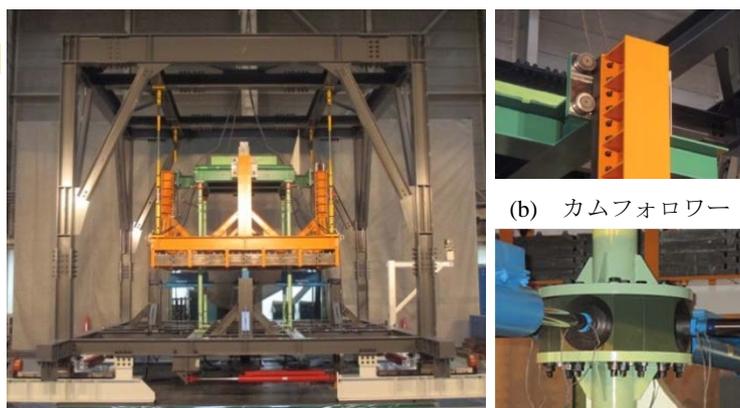


Fig. 9 試験体概要図

Schematic of Scaled Test Model



(a) 試験体外観

(c) TMD ダンパー球座

Photo 1 試験体写真

Photos of Scaled Test Model

Table 3 試験体諸元
Specification of Scaled Test Model

質量	振り錘：4.46t 倒立錘：1.74t 合計 6.20t
振り長さ	振り：2m 倒立振り：2m
線形固有周期	4.29 秒
水平最大変位	±1000 mm (振り角度±30°)
TMD ダンパー	オイルダンパー±300 mm 4 基 1 基あたり C=17.7kN/(m/s)
水平一体機構	カムフォロワー 4 箇所
FS 支持機構	十字型リニアガイド ±500 mm 4 基
FS ダンパー	オイルダンパー±500 mm 4 基 1 基あたり $F_r = 5kN$ 1 次減衰: 速度 2 乗に比例する減衰 $C_2 = 5kN/(m/s)$
FS 復元材	積層ゴム復元材 2 段×1 箇所 ゴム 1 個あたり 水平剛性：38N/mm 限界変形：600 mm

交方向からの相互作用の影響についても問題ないことを確認しておく必要がある。そこで、FS 架台付振り型 TMD の縮小試験体を製作して振動台実験により検証を行うこととした。ここでは、その概要及び実験結果について述べる。

4.1 試験体概要

試験体は、1次固有周期4秒程度の建物を想定して計画した。周期4秒のTMDを振りのみで実現しようとする、振り長さが4mとなるが、倒立振子を併用することにより、振り長さを半分の2mで実現する試験体とした。

Fig. 9に試験体の概要図、Photo 1(a)に試験体外観をそれぞれ示す。また、試験体の諸元をTable 3にまとめる。

振り(質量4.46t)は、上部フレームより可動長さ2mの吊ワイヤー(φ22.4mm)4本で支持され、倒立振り(質量1.74t)は、下部フレームより可動長さ2mの倒立ロッド(φ60.5×4mm)4本で支持されている。振りと倒立振子は、

振り及び倒立振りフレームの4辺に配置されたカムフォロワーにより水平方向に一体化され、鉛直方向のみに相対運動できるようになっている(Photo 1(b))。吊ワイヤー、倒立ロッドとも両端にユニバーサルジョイントを挿入し、水平2方向にスムーズに可動する機構となっている。

本振り型TMDの減衰機構としては、オイルダンパーを水平2方向に各2台、合計4台設置した。これらのオイルダンパーは、倒立振りフレームの中央に設けられた倒立振子の荷重を支持しないダンパーロッドに球座を介して取り付けられている(Photo 1(c))。オイルダンパーの高さ方向の取り付け位置は、可動長さ2mのダンパーロッド下部より0.6mの位置としている。これにより、振り及び倒立振子の設計最大ストローク1m(振り角度30°)に対して、必要なダンパーストロークは0.3mとなり、コンパクトなダンパー設計となっている。

FS機構としては、下部フレームの下にFS架台を設けてフレーム全体を十字型のリニアガイドで支持し、FS層の固定と作動の切替にはリリーフ型オイルダンパー、復元機構としては積層ゴム復元材を用いた。リリーフ型オイルダンパーの特性は、リリーフ荷重まではオリフィスによって速度の2乗に比例する特性を用いてできるだけ大きな減衰特性を有し、リリーフ後は減衰係数ができるだけ小さくなるような特性としている。

4.2 実験結果

4.2.1 固有周期及び減衰 FS架台を固定して、振動台をTMD固有周期近傍の周期4秒の正弦波1波で加振して取得した振り変位の自由振動波形から振幅のピーク値を抽出し、振幅レベルと固有周期、減衰の関係を求めた。その結果をFig. 10に示す。同図には、Table 3に示した振りと倒立振子の標準の質量に対して、振りと倒立振り間で錘(240kg)を移動した場合の固有周期と減衰の結果も併せて示す。また、各実線は式(1)の厳密解を用いて求め

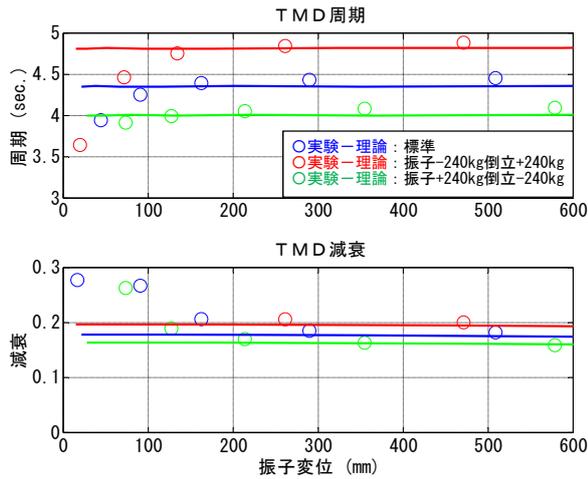


Fig. 10 振幅レベルと固有周期，減衰の関係
Natural Period and Damping due to TMD Displacement

た理論値を示す。

これより，振子振幅が100以下の小振幅では，カムフォロワーの摩擦等の影響により，固有周期が短く，減衰が大きくなるものの，それより大きな振幅では，ほぼ理論値通りの固有周期と減衰の特性が得られていることが確認された。また，振子と倒立振子間で錘を移動することにより，容易に周期調整できることが確認された。

4.2.2 TMD水平2方向動作性能の確認 振動台を固有周期付近の周期4.5秒の正弦波でXY水平2方向に同位相及び90°位相の加振，周期4秒と4.5秒の周期差をつけての加振を行い，水平2方向の加振においても，TMDがスムーズに動作することを確認した。そのうち，周期4.5秒の正弦波で同位相加振した時の時刻歴波形及び水平2方向の変位リサージュをFig. 11に示す。

4.2.3 FS架台の効果 振動台を固有周期付近の周期4.5秒の正弦波で定常加振を行い，入力加速度とTMD変位及びFS変位の関係を確認した。その結果をFig. 12に示す。これより，FS架台を固定した場合（FSなし），入力加速度の増大と比例して振子振幅も増大するが，FS架台がある場合は，入力加速度の増大とともにFS架台が作動して変位することにより，TMD変位の増大が抑制され，過大変位に対するフェールセーフ機構として機能することが確認された。

5. 解析手法の検証

縮小模型実験により，考案した機構で理論通りの挙動を示すことが確認された。しかしながら，TMD設計時に毎回縮小試験体による検証を行うわけにはいかない。そこで，解析シミュレーションにより，複雑な倒立振子と振子の挙動を再現できる手法を確立しておく必要がある。

倒立振子を有する振子型TMDの挙動は，大変形に伴う幾何学的非線形性を有しているため，幾何学的非線形性を考慮した有限要素解析を行うプログラムを用いて解析

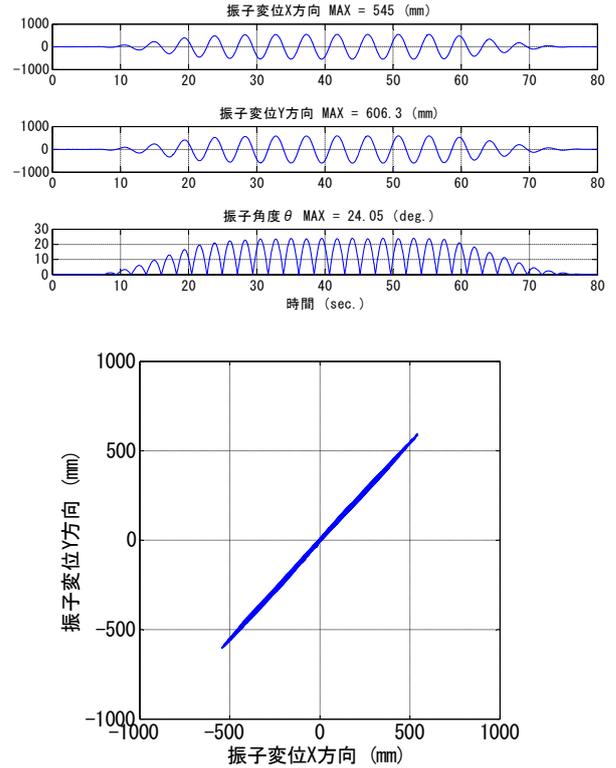


Fig. 11 水平2方向定常波同位相加振結果
Results of Bidirectional Sinusoidal In-Phase Excitation Test

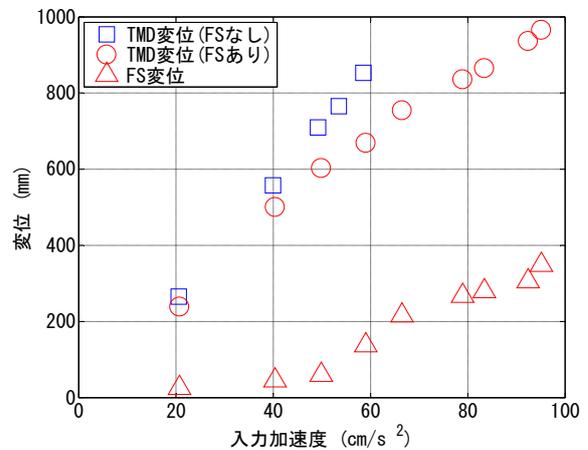


Fig. 12 入力加速度とTMD変位及びFS変位の関係
Relation between input ground acceleration and TMD/FS Displacement

を行うこととした。この解析では，式(1)の厳密解を水平2方向入力において解いていることとなる。

本章では，4章の性能確認試験を踏まえ，実地震時を想定した建物頂部の応答波を入力した振動台実験の結果とこれを模擬した解析結果を比較することで，解析の妥当性を確認する。

5.1 解析モデルの諸元

TMD単体の振動台実験とFS架台実験を模擬した解析

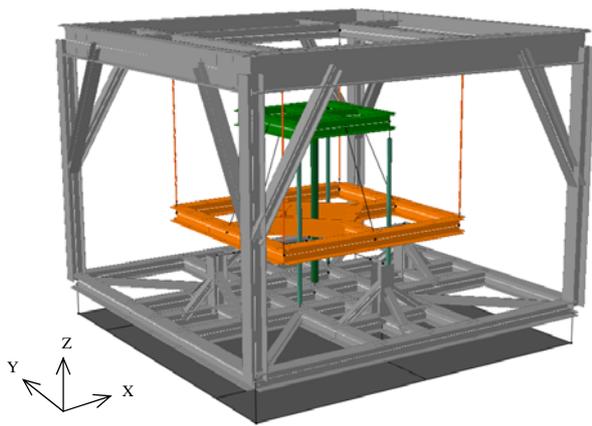
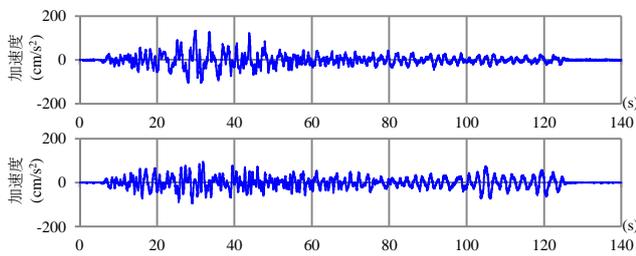
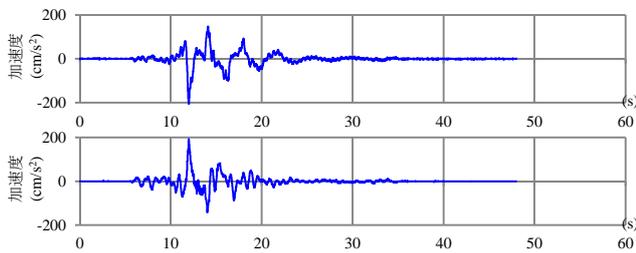


Fig. 13 解析モデル
Analysis Model



(a) 南海トラフ地震波 上：X方向，下：Y方向



(b) 上町地震波 上：X方向，下：Y方向

Fig. 15 入力加速度波形
Time Histories of Input Acceleration

モデルをFig. 13に示す。

各部材は線材要素でモデル化し、解析に用いた各諸元はTable 3に示した振動台実験と同様である。ここで、オイルダンパーのF-V線図をFig.14 に示すが、FSダンパーの1次減衰は線形近似してモデル化している。境界条件は接合部を模擬し、適切に設定した。

使用する入力波形は、超高層建物の頂部へTMDを設置することを想定し、1次固有周期4.0~4.5秒の建物頂部の2方向(X,Y)の応答波を用いる。解析ケースは南海トラフ地震波と上町断層帯地震予測波3B(以下、上町地震波と称す)の2ケースとし、入力波形をFig. 15に示す。

5.2 TMD単体実験の解析的検討

FS機構を固定としたTMD単体試験の結果のうち、TMDの応答変位の解析値と実験値との時刻歴応答波形の比

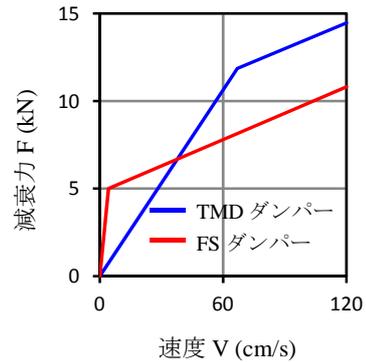
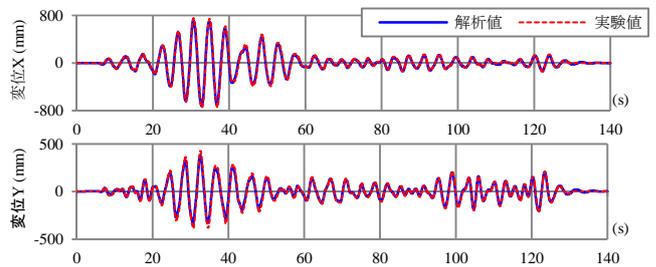
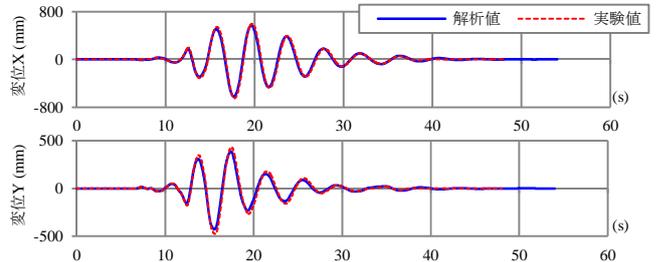


Fig. 14 オイルダンパーF-V線図
F-V Characteristic of Oil dampers

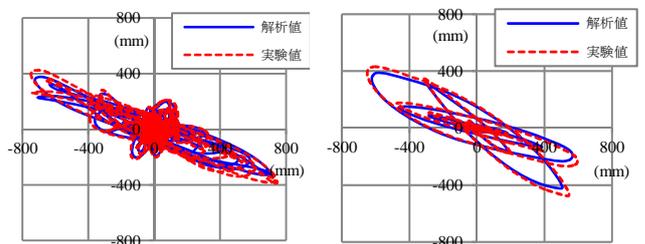


(a) 南海トラフ地震波 上：X方向，下：Y方向



(b) 上町地震波 上：X方向，下：Y方向

Fig. 16 TMD単体実験 TMD 応答変位
Time Histories of TMD Displacement for Tests w/o FS



(a) 南海トラフ地震波

(b) 上町地震波

Fig. 17 TMD単体実験 TMD 変位リサージュ図
X-Y Diagrams of TMD Displacement for Tests w/o FS

較図をFig. 16, リサージュ図をFig. 17に示す。これらの図に示す通り、解析値と実験値はほぼ一致しており、T

MD単体実験について精度良く解析可能であることを確認した。

5.3 FS 架台実験の解析的検討

3章で述べたように、設計時に想定した地震より大きな地震が発生したとき、TMDの過大変形を防止する機構としてFS架台を考案しており、TMD単体試験と同じ入力波形を用いた実験と解析から応答低減効果を確認する。FS架台実験の結果のうちTMDの応答変位、FS機構の応答変位の解析値と実験値の時刻歴応答波形の比較をFig. 18, リサージュ図をFig. 19に示す。図に示す通り、TMDの応答変位の解析値と実験値はほぼ一致しているが、FS架台の応答変位においては、あまり一致していない。この理由としては、本実験で用いた縮小試験用のFSダンパーのばらつき、FSダンパーの1次減衰の線形近似モデルの影響等が考えられるが、FS架台の応答はTMDの応答と比較して小さいため、TMDの応答への影響は限定的となっている。

また、TMD単体実験、FS架台実験の結果と2つの解析結果を比較すると、非定常な振動においてもFS架台によるTMDの過大変形防止効果が確認できる。

6. まとめ

南海トラフ地震波などで発生が予測されている長周期地震動に対応する超高層建物の安全確保を目的とした倒立振子併用型TMDを開発した。また、大地震対応型TMDの過大地震対策としてFS架台を提案した。理論検討、縮小模型実験、有限要素解析により、得られた知見を以下にまとめる。

- ① 単振子に比べ短い吊り長さで同等の周期を得ることが可能なため、装置のコンパクト化に有効である。
- ② 吊り側と倒立側の質量の配分により周期調整が可能であるため、竣工後でも容易に周期調整を行える。
- ③ 建物全体の設計においては、TMD部は線形な1自由度系モデルとして扱うことができ、最適条件も従来の方法が適用可能である。
- ④ 過大地震対策として、FS架台を設置することにより、TMDの損傷防止や、過大地震動時の制振性能の低下を防止できる。
- ⑤ 複雑な倒立振子と振子の挙動は、幾何学的非線形を考慮した有限要素解析により精度よく再現でき、TMDの装置の詳細設計に活用できる。

謝辞

貴重な助言をいただきました、京都大学 竹脇出教授、藤田皓平助教に感謝いたします。

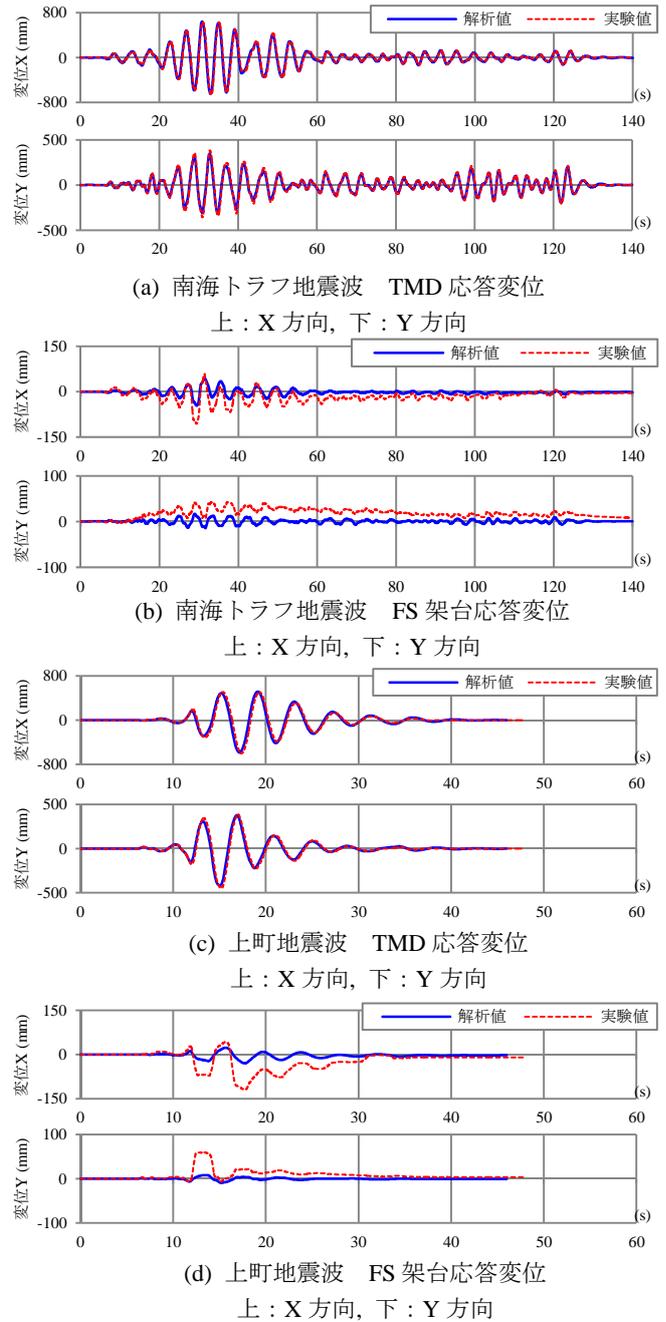


Fig. 18 FS 架台実験 TMD 及び FS 架台応答変位
Time Histories of TMD and FS Displacement for Tests with FS

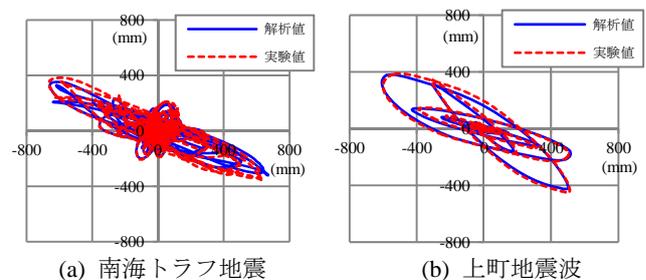


Fig. 19 FS 架台実験 TMD 変位リサージュ図
X-Y Diagrams of TMD Displacement for Tests with FS

参考文献

- 1) 大林組, 大地震に備える「(仮称) 新南海会館ビル」に大型のTMD制振装置を設置,
https://www.obayashi.co.jp/press/news20150904_1 ,
2016.9.16閲覧
- 2) 栗野治彦, 他: ストローク制御機能を有する超高層ビル用大地震対応TMDの開発(その1)～(その3), 日本建築学会大会梗概集構造Ⅱ, pp.749-754, 2014.9
- 3) 中山裕貴, 他: 既存超高層建物の屋内に設置する大型マスダンパーによる長周期地震動対策(その1)～(その2), 日本建築学会大会梗概集構造Ⅱ, pp.699-702, 2015.9
- 4) 江原栄次, 他: 安定・不安定結合型振子を利用した制振装置の開発に関する研究(その1), 日本建築学会大会梗概集B-2, pp.711-712, 1995.8
- 5) J.P. Den Hartog: Mechanical Vibrations, 4th edition, McGraw-Hill, 1956